



**FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ**

**HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE  
FORÇA: UM ESTUDO VISANDO CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO  
DE FÍSICA NO NÍVEL MÉDIO**

**WILSON ELMER NASCIMENTO**

**GUARATINGUETÁ – SP**

**BRASIL**

**2011**

**WILSON ELMER NASCIMENTO**

**HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE FORÇA: UM  
ESTUDO VISANDO CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE FÍSICA NO  
NÍVEL MÉDIO**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Licenciatura em Física da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Licenciatura em Física.

Orientadora: Profa. Dra. Valéria Silva Dias

Guaratinguetá

2011

Nascimento, Wilson Elmer

N24 História do desenvolvimento do conceito de força: um estudo visando  
contribuições para o ensino de física no nível médio / Wilson Elmer  
Nascimento – Guaratinguetá : [s.n], 2011.  
4h 80 f.: il.

Bibliografia: f. 77-80

Trabalho de Graduação em Licenciatura em Física – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Valéria Silva Dias

1. Ciência - História I- Título

CDU 501(091)



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá

HISTÓRIA DO DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO DE FORÇA: UM  
ESTUDO VISANDO CONTRIBUIÇÕES PARA O ENSINO DE FÍSICA NO NÍVEL  
MÉDIO

WILSON ELMER NASCIMENTO

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
**GRADUADO EM LICENCIATURA EM FÍSICA**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO  
DE GRADUAÇÃO EM LICENCIATURA EM FÍSICA

Profa. Dra. Isabel Cristina de Castro Monteiro  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

Profa. Dra. VALÉRIA SILVA DIAS  
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. JOSÉ LOURENÇO CINDRA  
UNESP-FEG

Profa. Dra. ALICE ASSIS  
UNESP-FEG

Dezembro 2011

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais Jairo e Maria de Lourdes e aos meus irmãos Wagner e Marisa.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, aquele que me guia todos os dias.

À minha família, que sem dúvida foi e é minha fonte de inspiração. Para minha amada mãe (Maria de Lourdes), queria dizer que tudo o que ela fez por mim não foi em vão. Para meu pai (Jairo) que tantas vezes não soube compreender minhas decisões, mas que, no fundo, estava querendo meu bem.

Aos meus irmãos (Wagner e Marisa) por todo o apoio e o amor, e aos queridos sobrinhos (Davi e Isabela) que, infelizmente pouco acompanhei nesses últimos anos.

Aos professores da faculdade que me guiaram por meio de conselhos e conversas, para os melhores caminhos possíveis. Muito especialmente, pela maneira que em suas disciplinas contribuíram para minha formação. São eles: Fernando, Alice, Amorim, Cindra, Honda, Marcelo Hott, Marisa, Gaspar, Zacharias, Silvia, Juliano, Sandra, Rafael Sfair e Rodrigo.

Minha especial gratidão pelo apoio, pela confiança e pela paciência à prof<sup>a</sup> Isabel e à prof<sup>a</sup> Valéria que acreditaram em mim em momentos fundamentais e que trouxeram significativas contribuições para minha formação, como professor e como pessoa.

A todos bolsistas, professores supervisores e orientadores do grupo PIBID, espaço onde vivi experiências riquíssimas.

A todos os colaboradores (bolsistas e voluntários) e alunos que passaram pelo cursinho pré-vestibular FEGVEST, onde tive a oportunidade de ajudar na criação e manutenção de um projeto tão grandioso para muitos, inclusive para mim.

Ao grupo de estudos GEPEC pela convivência frutífera e por fazer das minhas manhãs de quarta-feira as melhores possíveis, vou lutar para que continue assim.

Aos colegas de curso, tanto da licenciatura como do bacharelado, pela cooperação nos momentos duros dos estudos e pelos sólidos relacionamentos que foram construídos. São eles: Piqueno, João Grilo, Pedro Caconde, Leandro, Chico, Bixão e Alf.

A todos moradores e ex-moradores da República Masmorra, onde com toda certeza, entre churrascos e cervejas, conheci amigos pra vida inteira. Entre eles

destaco: Jaspion, Elkis, Bocca, Gorilla, Shinoru, Gary, Fabroxa, Nemo, Cotis e Coragem.

Aos contemporâneos da Moradia Estudantil, em especial os do segundo andar, que foi minha casa durante grande parte do tempo.

Aos que não foram citados, que ajudaram direta ou indiretamente nesta fase de minha vida.

“O cientista não estuda a natureza porque ela é útil; ele a estuda por que tem prazer nisso, e ele tem prazer nisso por que ela é linda. Se a natureza não fosse linda, não valeria a pena conhecê-la, e se não valesse a pena conhecê-la, não valeria a pena viver”.

(Henri Poincaré)



NASCIMENTO, W. E. **História do desenvolvimento do conceito de força: um estudo visando contribuições para o ensino de Física no nível médio.** 2011. Trabalho de Graduação em Licenciatura em Física – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

## **RESUMO**

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo sobre o desenvolvimento do conceito de força e suas possíveis aplicações no ensino de Física. O estudo histórico concentrou-se na filosofia natural aristotélica, nas teorias medievais de força impressa e na mecânica clássica newtoniana. O conceito de força newtoniano também foi objeto de uma aula de Física analisada neste trabalho. Nessa aula, ministrada em um curso pré-vestibular, concepções espontâneas ou concepções alternativas dos alunos sobre o conceito de força se mostraram bastante arraigadas, levando a estudos sobre o Modelo de Mudança Conceitual e sobre obstáculos epistemológicos, na perspectiva bachelardiana. Os referenciais teóricos adotados nos levaram a traçar paralelos entre as concepções espontâneas reveladas pelos alunos e algumas concepções, sobre o conceito de força, encontradas no estudo histórico. Os resultados obtidos revelam que, embora algumas concepções antigas tenham sido substituídas cientificamente pelo conceito de força newtoniano, elas ainda estão presentes nas ideias dos estudantes e resistem a mudanças mesmo após o estudo das leis de Newton. Como resultado principal aponta-se que a História da Ciência pode ser um grande aliado para desconstrução de concepções alternativas, particularmente, quando essas concepções foram anteriormente apresentadas e superadas ao longo da história do desenvolvimento de um conceito.

**PALAVRAS-CHAVE:** Conceito de força. História da Ciência. Concepções alternativas/espontâneas.

NASCIMENTO, W. E. **History of Development of the Concept of Force: a study to contributions to physics teaching at the high school.** 2011. Graduation Thesis as Requirement for the Degree in Physics Course – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

### **ABSTRACT**

This study presents the results of a study on the development of the concept of force and their possible applications in physics teaching. The historical study has focused on Aristotelian natural philosophy, medieval theories of strength in impressed and on classical Newtonian mechanics. The Newtonian concept of force was also an object lesson of physics analyzed in this study. In this lesson, conducted in a pre-university course, spontaneous conceptions or alternative conceptions of students about the concept of force proved very entrenched, resulting in studies on the Model Change on Conceptual and epistemological obstacles in view Bachelardian. The theoretical frameworks adopted led us to trace parallels between spontaneous conceptions revealed by the students and some views about the concept of force found in the study of history. The results show that while some old conceptions have been replaced by scientifically Newtonian concept of force, they are still present in the students' ideas and resist to changes even after the study of Newton's laws. Like main result shows that the history of science can be a great ally for the deconstruction of alternative conceptions, particularly when these concepts were previously presented and overcome the course of history of the development of a concept.

**KEYWORDS:** Concept of force, History of Science, Alternative conceptions/spontaneous.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Um esquema simplificado do universo aristotélico..	22
Figura 2: Representação do cosmos aristotélico..	24
Figura 3: Representação do processo de <i>antiperistasis</i> .....	28
Figura 4: Forças atuando sobre um objeto em queda, segundo Hiparco.....	30
Figura 5: Trajetória de um lançamento horizontal, segundo Avicena. ....	33
Figura 6: Trajetória de um lançamento, segundo o <i>impetus</i> de Buridan.....	36
Figura 7: Representação do movimento de queda, segundo Buridan. ....	37
Figura 8: Representação do modelo heliocêntrico de Copérnico .....	40
Figura 9: Esquema da experiência de pensamento proposta por Galileu.....	45
Figura 10: Exercício vestibular FUVEST 1996.....	55
Figura 11: Representação de uma força tangente à trajetória.....	61

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

HFC	História e Filosofia da Ciência
MMC	Modelo de Mudança Conceitual
PCN	Parâmetros Curriculares Nacionais
EC	Ensino de Ciências

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>1 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO CONCEITO DE FORÇA.....</b>	<b>14</b>
1.1 O conceito de força na ciência grega – a Física aristotélica.....	14
1.2 Os conceitos de força na ciência pré-clássica – Teorias de força impressa ..	29
1.3 Os primórdios da mecânica clássica – uma nova visão de mundo .....	39
1.4 O conceito de força na mecânica newtoniana.....	47
<b>2 UMA EXPERIÊNCIA DE ENSINO.....</b>	<b>54</b>
<b>3 REFERENCIAIS TEÓRICOS SOBRE APRENDIZAGEM .....</b>	<b>54</b>
3.1 O Modelo de Mudança Conceitual .....	57
3.2 Alguns aspectos da teoria da equilibração de Piaget.....	62
3.3 Obstáculo epistemológico de Bachelard.....	64
<b>4 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA (HFC) NO ENSINO .....</b>	<b>68</b>
<b>5 REINTERPRETANDO O EPISÓDIO DA AULA .....</b>	<b>70</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>77</b>

## INTRODUÇÃO

Nossa motivação para estudar o desenvolvimento histórico do conceito de força se deve a centralidade desse conceito na Física, particularmente, no estudo da mecânica. Sendo o conceito de força tão essencial, sentimos a necessidade de conhecer mais sobre esta grandeza que, por muitas vezes, será objeto de nossas aulas como professor. E pensando em sua importância para a Física, até mesmo para a Física contemporânea, questionamos: como e quando foram as primeiras indagações sobre algo parecido com o que chamamos de força? Como se explicavam os movimentos antes do conceito newtoniano estar estabelecido? Seria interessante levar para a sala de aula a história do conceito de força? Fazer isso me ajudaria de alguma forma a ensinar este conceito?

Na tentativa de encontrar respostas para os questionamentos, iniciamos esse trabalho estudando a evolução do conceito de força do ponto de vista histórico e filosófico. Começamos pelo pensamento científico acerca dos movimentos e suas causas, não deixando de lado questões cosmológicas, desde as ideias aristotélicas, passando pelas teorias medievais de força impressa até chegar na conceituação de força de acordo com a mecânica newtoniana.

Enquanto fazíamos tal estudo, tivemos a oportunidade de ministrar uma aula de Física, em um curso pré-vestibular, cujo tema eram as leis de Newton e o conceito de força. Nessa aula, fomos surpreendidos pela resistência à mudança das ideias prévias sobre o conceito de força que os alunos apresentaram.

Então, em paralelo com o estudo sobre o desenvolvimento histórico do conceito de força, iniciamos um estudo sobre concepções alternativas e encontramos no Modelo de Mudança Conceitual e nos obstáculos epistemológicos de Bachelard, bons referenciais para entender os acontecimentos ocorridos na aula.

No capítulo 1, intitulado “Desenvolvimento histórico do conceito de força”, apresentamos o desenvolvimento das ideias que permearam a construção do conceito de força, começando pelo pensamento dos filósofos gregos. Partindo das concepções de natureza dos filósofos pré-socráticos seguimos descrevendo a evolução das concepções sobre os movimentos durante o período da Antiguidade até chegarmos nas

ideias aristotélicas. Nesse momento discutimos, em maior profundidade, as concepções acerca da compreensão dos movimentos e suas causas, sob a perspectiva aristotélica. Em seguida, discutimos algumas teorias propostas por filósofos da Idade Média, como a teoria do *impetus*, com destaque para os trabalhos de Filoponos, Buridan e Oresme. Uma seção do capítulo é dedicada ao heliocentrismo, o modelo cosmológico sustentado, principalmente, por Copérnico que, juntamente com os estudos de Galileu e Kepler, culminaram no “nascimento” da mecânica clássica. O capítulo se encerra com as ideias newtonianas sobre os fenômenos dinâmicos da natureza. Exploramos, a partir da obra *Principia*, o conjunto de definições e leis dos movimentos dos corpos, proposto por Newton.

No capítulo 2, intitulado “Uma experiência de ensino” descrevemos os eventos ocorridos em uma aula sobre as leis de Newton. A aula por nós ministrada em um cursinho pré-vestibular, suscitou uma série de questionamentos sobre os mecanismos de aprendizagem de conceitos científicos.

Apresentamos rapidamente algumas referências teóricas, no capítulo 3, que nos auxiliaram na compreensão do ocorrido na aula. Os referenciais discutidos se referem ao Modelo de Mudança Conceitual, alguns conceitos da Teoria da Equilíbrio de Piaget e sobre o conceito de obstáculos epistemológicos, conforme proposto por Gaston Bachelard.

No capítulo 4, denominado “História e Filosofia da Ciência no Ensino de Ciências”, destacamos algumas possibilidades e dificuldades da inserção da HFC no ensino, apoiados na literatura sobre o assunto. Procuramos justificar a importância de seu uso no ensino de Física de forma geral e, posteriormente, no capítulo 5, procuramos olhar para os acontecimentos da aula sob as perspectivas dos referenciais estudados.

No capítulo 6, apresentamos nossas considerações finais, destacando as contribuições da elaboração desse trabalho para nossa formação docente.

## 1 DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DO CONCEITO DE FORÇA

Para estudar a história do pensamento científico sobre o movimento e suas causas, consideramos conveniente separar a história em três grandes períodos. O primeiro período referente à física aristotélica, baseada nos princípios da filosofia natural, que perdurou quase dois milênios. O segundo período relativo à física do *impetus*, elaborada em torno do século XIV, principalmente, pelos parisienses Jean Buridan e Nicolau Oresme. O terceiro período compreende a física de caráter matemático e experimental de Galileu, Newton e outros.

### 1.1 O conceito de força na ciência grega – A física aristotélica

São muitas as ideias produzidas na Antiguidade sobre os fenômenos da natureza, mas é na obra de Aristóteles, de Estágira (384 a.C. – 322 a.C.), que encontramos as maiores contribuições para a física. Suas ideias a respeito do movimento dos corpos celestes e terrestres, por exemplo, são tão importantes para a história da humanidade como são seus outros escritos em diversas áreas, como Lógica, Ética, Poesia, Retórica, Governo.

Para um melhor entendimento da física de Aristóteles e sua conceituação sobre a grandeza que (hoje) chamamos de força, deve-se estar atento ao modo como os aristotélicos enxergavam o universo, ou seja, como era e em que se baseava a cosmologia de seu tempo. Para isso, vale destacar alguns filósofos e pensamentos que antecederam e de certa forma influenciaram, as ideias aristotélicas.

Podemos começar pelos filósofos gregos pré-socráticos, pois, considera-se que a filosofia ocidental, bem como a ciência, surgiu na Grécia antiga. Assim como disse Heisenberg:

No domínio prático, outros povos e outras culturas alcançaram um saber comparável ao dos gregos. Mas o que distinguiu desde o primeiro momento o pensamento grego dos de outros povos foi a aptidão para reduzir todos os problemas a uma questão de princípios teóricos, alcançando assim pontos de vista a partir dos quais foi possível ordenar a policroma multiplicidade da experiência, tornando-a acessível ao pensamento humano. O que, sobretudo, caracterizou o mundo grego foi esta ligação



entre a formulação teórica dos problemas e a atuação prática, e depois, quando o ocidente se abriu ao Renascimento, voltou a ocupar o centro da nossa história, produzindo a ciência e a técnica modernas (HEISENBERG, 1981, p.52-53).

Os filósofos pré-socráticos viveram durante um período de cerca de duzentos anos, de 600 a.C. a 400 a.C. aproximadamente. Para os primeiros pré-socráticos, o princípio de todas as coisas no universo era uma única substância. Esta substância seria a responsável pela geração de todo o universo e de tudo que nele se encontra. Dentre os filósofos pré-socráticos podemos destacar Tales, Anaximandro e Anaxímenes, todos da cidade de Mileto, região da Jônia, onde hoje se encontra a Turquia.

Tales (624 a.C. – 545 a.C.) é conhecido como o primeiro estudioso da natureza (*physikoi*) e como precursor da ideia de que tudo se originou a partir de uma mesma substância (PEDUZZI, 2008). Para Tales a substância que seria o princípio de tudo (*arché*) era a água, assim, da água todas as coisas provinham. Para ele tudo estava em uma transformação constante, em um movimento eterno. Segundo ele, tudo possuía uma “alma” (*anima*) e, por isso, todo o cosmo deveria estar em movimento, ou seja, em transformação.

Anaximandro (610 a.C. – 545 a.C.) se contrapôs à ideia de Tales de que a água era o princípio de tudo, para ele, a substância primordial (*arché*) era uma substância sutil, infinita<sup>1</sup>, que não se poderia discernir. Ele denominou esta substância de “*apeíron*”, palavra grega que significa indeterminado ou ilimitado. Ele pressupunha a existência de um mundo em um ciclo eterno de criação e destruição, onde a matéria aparece e desaparece continuamente.

O terceiro dos milesianos citados é Anaxímenes (580 a.C – 500 a.C.) e para ele o princípio de tudo era o ar. O processo de diferenciação da matéria se daria por meio de condensação e da rarefação. Para Anaxímenes, o fogo era a rarefação do ar e a água e a terra eram resultados de condensações do ar. Os movimentos de convecção eram os responsáveis pela separação das substâncias mais rarefeitas para as extremidades do universo (estrelas) e as mais condensadas para o centro do universo (terra).

---

<sup>1</sup> Substância infinita significava que preenchia todo o espaço e que não era uma substância que se consumia, que acabava. Não se pode confundir com a ideia de que o universo era infinito, algo inconcebível naquele momento.

Podemos observar que para estes filósofos de Mileto os movimentos, entendidos como transformações, não necessitavam de uma causa para ocorrer, eram concebidos como um elemento da natureza. O pensamento corrente era que uma força vital teria colocado tudo em movimento no início do universo, força essa, de caráter divino.

Em Éfeso, também na Jônia, um pouco mais ao norte de Mileto, viveu o filósofo Heráclito (576 a.C. – 480 a.C.). Ele defendia a necessidade de uma causa para as transformações. Para Heráclito tudo estava em constante mudança, nada era permanente e, diferentemente dos milesianos, Heráclito via o fogo como a substância responsável pelo dinamismo do universo e pelas mudanças do mesmo, era ele o elemento primordial. Como afirma Max Jammer, em Heráclito notamos uma das mais antigas concepções dinâmicas da natureza.

Uma das primeiras concepções dinâmicas da natureza foi a doutrina de Heráclito das tensões opostas, segundo a qual todas as coisas, embora estáveis na aparência, eram campos de batalha de forças antagônicas; sua estabilidade era apenas relativa ou até ilusória; o conceito de força continuou confinado a esse antagonismo intrínseco e ao conflito equilibrado de opostos no objeto individual, sendo cada item da existência o campo de batalha de forças e tensões opostas (JAMMER, 2011, p.47- 48).

A doutrina de tensões opostas de Heráclito ganha materialidade com Empédocles (492 a.C. – 432 a.C.) da cidade de Agrigento, na região da Sicília, sul da Itália. Este filósofo é considerado o primeiro pluralista, ou seja, aquele que assumiu que todas as coisas têm sua origem a partir de quatro elementos básicos, sendo eles: terra, água, ar e fogo. A grande diversidade das substâncias encontradas seria explicada pelas diversas proporções possíveis desses quatro elementos.

Ao incorporar a doutrina das tensões opostas, Empédocles inseriu mais dois princípios básicos o “amor” e o “ódio”. Estes elementos, que mais podem ser considerados como forças reguladoras, são os responsáveis pela ocorrência dos fenômenos e as transformações. A “força do amor” seria a responsável pela aproximação dos diversos elementos e a “força do ódio” responsável pela separação das substâncias.

Outro personagem que ilustra os percussores de uma concepção dinâmica da natureza é Anaxágoras (500 a.C. – 428 a.C.) da cidade de Clazômenas, na Jônia,

região da Ásia Menor. Anaxágoras acreditava na ideia de que os elementos são infinitos e que a causa de todas as mudanças eram misturas e separações. Ao contrário de Empédocles e sua doutrina do amor e do ódio, Anaxágoras acreditava que o regulador das coisas era a *nous*, um princípio metafísico entendido como uma “mente”.

As doutrinas do amor e ódio, de Empédocles, e a *nous*, de Anaxágoras, tentavam explicar as causas do movimento. “Tateando, eles buscavam a concepção física posterior de força, mas é claro que ainda não conseguiam desenredá-la por completo da concepção do corpo” (BURNET, 1950 apud JAMMER, 2011, p. 48).

Passando pelos filósofos pré-socráticos chegamos ao mentor de Aristóteles, Platão (428 a.C. – 348 a.C.) que viveu em Atenas, na Grécia. Para Platão, o movimento era uma propriedade inerente à matéria. A matéria, do ponto de vista dele, era um organismo vivo. “Assim, para Platão, a realidade física era dotada de movimento porque a natureza tinha uma alma vivente imortal” (CRUZ, 1985, p.20).

Por sua concepção de movimento e sua explicação para a origem do mesmo, percebemos que o conceito de força, para Platão, estava intimamente ligado a sua metafísica do ser. Para ele, os diferentes tipos de matéria surgiam por meio da atividade de forças emanadas de uma alma universal. O fato de um corpo ser leve ou pesado era uma propriedade natural do corpo.

Outra ideia importante de Platão foi a lei de atração dos semelhantes, na qual propôs que terra era atraída por terra, água era atraída por água e assim por diante. Esta lei ilustra a crença na tendência da existência de lugares naturais, ideia que se tornou fundamental, posteriormente, na física aristotélica.

Após estas breves considerações sobre as ideias predominantes entre os pré-socráticos, passando por Platão, vamos discutir algumas das proposições de Aristóteles, considerado por muitos historiadores um dos personagens que mais influenciaram o pensamento ocidental.

Aristóteles contribuiu em diversas áreas do conhecimento, como a Física, Astronomia, Biologia, Filosofia, Política etc. Seu pensamento influenciou todo o ocidente por séculos.

Se alguém desejava saber, a maneira de o conseguir era ler os textos de Aristóteles com cuidado, estudar comentários sobre Aristóteles para compreender o seu significado em passagens difíceis, e explorar questões que tinham sido levantadas e debatidas a partir dos livros de Aristóteles (DRAKE, 1981 apud PEDUZZI, 2008, p.22).

Para estudarmos de maneira mais significativa as ideias aristotélicas, partimos da concepção sobre a estrutura do universo, o chamado “cosmos aristotélico”, considerando seus elementos constituintes e a maneira como eram organizados.

Aristóteles, em sua observação da natureza, via uma diferença crucial entre os fenômenos ocorridos na Terra e os fenômenos ocorridos no firmamento. Na Terra, Aristóteles notava que tudo estava em constante mudança, os seres vivos, o clima, as paisagens, os diversos movimentos, etc. Para ele, estas constantes mudanças estavam associadas ao fato de a Terra ser um mundo imperfeito e corruptível.

No que diz respeito ao mundo dos céus, para Aristóteles, tudo era harmonioso e imutável, as estrelas, o Sol, os planetas, a Lua. A única mudança que havia no firmamento era o movimento dos astros. Um movimento circular, perfeito<sup>2</sup> e eterno, sobre o qual discutiremos mais adiante.

O universo para Aristóteles, devido a essas diferenças entre os fenômenos observados no mundo terrestre e no mundo dos céus, era dividido em duas partes qualitativamente distintas: supralunar (acima da esfera da lua) e sublunar (abaixo da esfera da lua). O mundo da perfeição e o mundo da imperfeição, respectivamente.

Assim como Empédocles, Aristóteles rejeitou a ideia de um elemento primordial único e adotou a doutrina dos princípios múltiplos, as quatro essências - terra, água, ar e fogo - como constituintes de todas as coisas situadas na Terra, ou seja, no mundo sublunar. Para ele, as diversas combinações destes quatro elementos eram as responsáveis pela formação da diversidade encontrada na terra.

Já o mundo supralunar era composto exclusivamente por uma quintessência, denominada éter. Elemento inalterável, imperecível, imponderável e que não se misturava com os elementos terrestres. Não só os corpos celestes eram constituídos

---

<sup>2</sup> Movimento circular ser considerado perfeito era uma ideia básica de Platão, cujo ideal de perfeição era satisfeito pela simetria, influência de concepções pitagóricas.

por esse elemento, como também toda a região supralunar era preenchida pelo éter. Sobre este quinto elemento, Aristóteles, comenta o seguinte em sua obra *De Caelo*:

Parece que o nome do primeiro corpo tem sido transmitido até os nossos dias desde o tempo dos antigos que alimentavam concepções idênticas às nossas [...] eles acreditavam que o primeiro corpo era algo diferente da terra, do fogo, do ar e da água, e denominaram éter à região mais alta, e lhes deram este nome porque 'ocorre sempre' na eternidade do tempo (ARISTÓTELES apud ÉVORA, 2005, p.138).

Aristóteles interpretava que as constantes mudanças ocorridas no mundo terrestre (região sujeita a imperfeições, gerações e degenerescências) e a perfeição do mundo dos céus (região da imutabilidade), deveriam ser resultado de um propósito específico, ou seja, havia uma predeterminação para que as coisas se comportassem da maneira como se comportavam.

[...] as coisas estão (ou devem estar) distribuídas e dispostas de uma maneira bem determinada; que estar aqui ou ali não lhes é indiferente, mas que, ao invés, cada coisa possui, no universo, um lugar próprio, conforme a sua natureza. Um lugar para cada coisa e cada coisa no seu lugar; a noção de "lugar natural" traduz esta exigência teórica da física aristotélica (KOYRÉ, 1986, p.22-23).

Essas interpretações resultaram em um conceito fundamental na física aristotélica, o de lugares naturais. Esse conceito, talvez resquícios de ideias platônicas, como dissemos anteriormente, fundamentou uma concepção sobre o universo que perdurou por vários séculos. "A noção de 'lugar natural' traduz uma concepção puramente estática da ordem. Com efeito, se tudo estivesse 'em ordem', todas as outras coisas repousariam nos seus lugares naturais, lá permaneceriam, e de lá não se mexeriam" (KOYRÉ, 1986, p.23).

Além da noção de lugar natural carregar uma concepção de universo estático, propõe que esse universo é também limitado, ou seja, finito. Em um universo que fosse infinito não faria sentido falar em um centro, ou em um lugar privilegiado (lugar natural).

A doutrina aristotélica compreendia a ideia de que o universo seria finito, esférico, e a região das estrelas (esfera das estrelas) seria o seu limite, não havendo

nada além dela<sup>3</sup>. “Na ciência de Aristóteles, matéria e espaço andam juntos [...] e devem terminar juntos; não é preciso construir uma parede para limitar o universo e a seguir ficar se interrogando sobre o que limita esta parede” (KUHN, 1990 apud PEDUZZI, 2008, p.23).

Além disso, a adoção exclusiva dos princípios dos lugares naturais por Aristóteles levou à dicotomia radical dos fenômenos físicos em processos celestes e terrestres, cada qual com leis físicas autônomas, uma dicotomia que só viria a ser descartada com a teoria newtoniana da atração universal (JAMMER, 2011, p.55).

Para Aristóteles, o centro do universo era o lugar natural do elemento terra. Assim, sendo a Terra constituída predominantemente do elemento terra (obviamente, não era conhecida, naquela época, a predominância da água na constituição do nosso planeta), a mesma deveria estar localizada no centro do universo.

A Terra no centro do universo significava, sobretudo, que o homem estava no centro de tudo. No caso, sendo o homem a máxima expressão divina, criado a sua imagem e semelhança, não poderia estar em outro lugar, senão no centro da criação.

Uma das contribuições mais importantes da física aristotélica, e consequência desta concepção sobre o universo, é o estudo dos movimentos.

Aristóteles dedicou grande parte de sua obra denominada *Física* para detalhar o estudo dos movimentos. Para ele, movimento, significava mudança e ele classificou as mudanças em quatro modalidades: substância (geração e destruição); qualidade (alterações sensíveis); quantidade (aumento e diminuição); lugar (locomoção).

Para nossa discussão sobre o desenvolvimento do conceito de força, o tipo de movimento que mais nos interessa é o movimento local. Um importante aspecto a ser comentado é que o conceito aristotélico de movimento corresponde a um processo de mudança e não a um estado, como seria a interpretação da mecânica inercial após Galileu, assim como veremos mais adiante.

---

<sup>3</sup> Vale a pena ressaltar que as representações do cosmos aristotélico que vieram posteriormente apresentavam ainda mais uma esfera além da esfera das estrelas, a esfera do Primeiro Motor, ver figuras 1 e 2.

De acordo com Aristóteles, “a natureza (*physis*) é princípio de movimento (*kinesis*) e de mudança (*metabolé*); e é a Natureza que estamos investigando, assim devemos entender o que é o movimento, pois se o movimento não é conhecido, a natureza (*physis*) não é conhecida” (ARISTÓTELES apud ÉVORA, 2005, p.129).

Como já foi dito, segundo Aristóteles, cada uma das coisas, sejam aquelas pertencentes à região sublunar ou à região supralunar tem seu lugar natural. O movimento das coisas para seus respectivos lugares naturais, são chamados de movimentos naturais. Por exemplo, se um corpo constituído do elemento terra fosse retirado de seu lugar natural, o elemento tendia a voltar ao seu lugar natural, que neste caso é o centro do universo, a Terra.

Dentro do esquema de pensamento aristotélico o universo seguia uma ordem hierárquica de lugares próprios que explicava o fato dos rios, lagos e oceanos se encontrarem sobre da superfície da Terra; e o ar, por sua vez, ocupar o lugar acima dos rios, lagos e oceanos. O fogo por sua vez, tinha seu lugar natural acima dos outros, o que explicava o fato das chamas do fogo se dirigissem para cima, em direção à periferia do mundo.

Portanto, de acordo com Aristóteles, cada lugar tem certa potência (*dynamis*) específica capaz de produzir efeitos distintos tal que corpos pesados movem-se, naturalmente, ‘para baixo’, seu lugar natural; e corpos leves ‘para cima’.

[...] chamo grave aquilo que está apto a mover-se [naturalmente] para o centro, e leve aquilo que está apto a mover-se a partir do centro; muito pesado o que está abaixo de todas as coisas que se movem para o centro, e muito leve o que se situa acima de todas as coisas que se movem para cima. É necessário que tudo que se move para cima ou para baixo possua leveza ou peso ou ambos, embora não em relação ao mesmo corpo; pois são corpos pesados e leves relativos a um ou outro. Por exemplo, o ar é leve relativo à água e a água é leve relativa à terra (ARISTÓTELES apud ÉVORA, 2005, p.136).

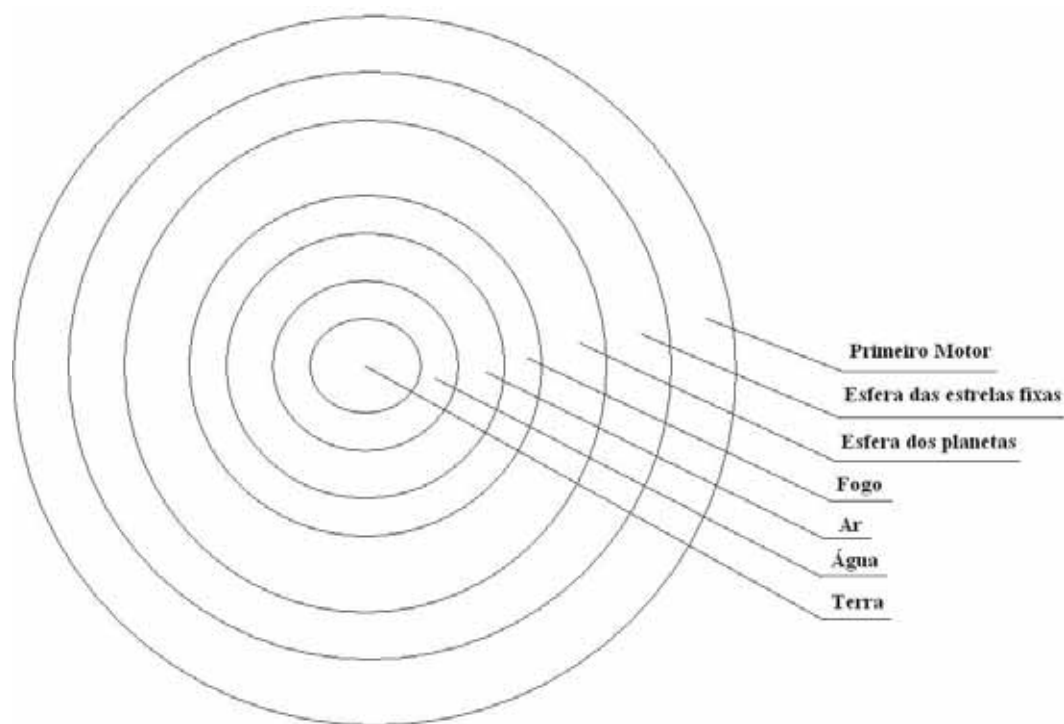


Figura 1: Um esquema simplificado do universo aristotélico. Sendo a região sublunar composta pelas camadas concêntricas dos elementos terra, água, ar e fogo e a região supralunar composta pelas camadas dos planetas e das estrelas fixas. A última camada representa o “primeiro motor”, associado à providência divina.

Na região sublunar somente o movimento natural retilíneo era possível. Sendo as direções destes movimentos retilíneos, determinadas de acordo com o elemento preponderante na constituição do corpo.

A esfera da Terra é rodeada concêntricamente por uma série de esferas ocas, as primeiras delas correspondem às dos elementos terrestres, água, ar e fogo respectivamente, tal que o lugar natural da água é a região imediatamente após a região central e o seu movimento natural é retilíneo para baixo, exceto na região central; o lugar natural do fogo, que é absolutamente leve, é a região externa da esfera sublunar e seu movimento é retilíneo para cima em relação ao centro do Universo; finalmente, o lugar natural do ar é a região intermediária entre a água e o fogo, e seu movimento natural é retilíneo para cima, exceto na região do fogo. O lugar e o movimento naturais dos corpos compostos por mais de um elemento correspondem àqueles do elemento preponderante (ÉVORA, 2005, p.136.).

No cosmos aristotélico o “para baixo” e o “para cima”, eram conceitos absolutos, uma vez que os movimentos naturais eram regidos pela natureza do corpo, como já foi dito, e não por alguma ação à distância entre corpos. A física aristotélica não abriga nenhum conceito de ação à distância, a noção de gravidade (como a que conhecemos





Figura 2: Representação do cosmos aristotélico. Retirada de APIANUS, 1539 apud ÉVORA, 2005, p.153.

Se no mundo sublunar o movimento natural era retilíneo, no supralunar o movimento natural era circular, ou seja, o movimento dos astros era circular. Os astros estavam, de acordo com a concepção de lugar natural, em seus respectivos lugares próprios e realizando movimentos uniformes, circulares e perpétuos (ciclos repetitivos). Acreditava-se que o movimento circular era o único movimento que poderia perdurar indefinidamente num universo finito.

Os corpos celestes eram considerados superiores e anteriores (foram criados antes) em relação aos corpos terrestres. Essa superioridade era decorrente do seu movimento natural (circular), visto que se acreditava que o círculo pertencia à classe das coisas perfeitas e, conseqüentemente, era superior à linha reta.

[...] com efeito, o perfeito é por natureza anterior ao imperfeito; ora, o círculo entra na classe das coisas perfeitas, enquanto que a linha reta não é, em nenhum caso, perfeita: não são perfeitas, com efeito, nem a linha reta infinita – pois ela deveria ter limite e fim –, nem qualquer linha reta finita – pois todas têm alguma coisa para fora, pois que se pode prolongar qualquer linha reta (ARISTÓTELES apud ÉVORA, p.138).

As esferas dos corpos celestes moviam-se uma com as outras, cada uma movendo e sendo movida. No entanto, para Aristóteles, o movimento deveria ter um início. Deveria haver um Primeiro Motor (*primum mobile immotum*), que seria uma inteligência astral, um ser incorpóreo, indivisível, ilimitado, imutável, perfeito e eterno. Seria este o deus aristotélico. Este Primeiro Motor compreende a última das esferas do cosmo aristotélico esquematizado na figura 2. Ao explicar a regularidade dos movimentos no mundo supralunar, Aristóteles referiu-se ao Primeiro Motor:

Tudo o que é movido o é por alguma coisa; donde a irregularidade do movimento deve provir do motor ou do objeto movido, ou de ambos. Se o motor não age com uma força constante, ou se o objeto se modifica em vez de permanecer constante, ou se ambos se alteram, nada impede o movimento do objeto de ser irregular. Mas nenhuma dessas hipóteses pode ser explicada ao céu, pois demonstrou-se que o objeto do movimento é primário, simples, não gerado, indestrutível e totalmente imutável, e podemos entender que o motor tem muito mais razão para ser assim: somente o que é primário pode mover o primário; o que é simples, o simples; o que é indestrutível e não gerado, o indestrutível e não gerado (ARISTÓTELES apud JAMMER, p.63).

Além dos movimentos naturais, discutidos anteriormente, existiam outros tipos de movimento na mecânica aristotélica, os chamados movimentos violentos ou forçados.

Basicamente, os movimentos violentos eram todos os movimentos locais que não eram naturais. Esses movimentos jamais ocorriam espontaneamente, exigiam a ação de uma força exercida por algum outro corpo. Vale ressaltar que Aristóteles não entendia força da mesma forma que hoje, o que ele concebia era um motor ou em uma causa para o movimento.

Na verdade, Aristóteles reconhecia dois tipos de força: a concepção platônica de força inerente a matéria, que ele chamava de “natureza” (*physis*), e a força como emanção da substância, a força do empurrar e puxar, provocando movimento em um segundo objeto, e não em si mesmo (JAMMER, 2011, p.58).

Para Jammer (2011), a mecânica aristotélica explora mais o conceito de força como agente envolvido no puxar ou empurrar. Mas, em alguns momentos oscila entre este conceito (força como emanção da substância) e o conceito platônico de força como inerente à matéria, algo similar ao conceito atual de energia.

Na visão aristotélica, o segundo tipo de força, proveniente da substância, não podia ser inteiramente desvinculado da substância que se originava. Por isso a força, como conceito técnico na mecânica aristotélica, fica confinada as duas formas de realização: empurrar ou puxar. Visto que a força é inseparável de seu sujeito, decorre daí que o motor, como sujeito da força, deve estar em contato constante com o *motum*, o movido, o objeto sobre o qual a força é exercida. (JAMMER, 2011, p.58.).

A noção de força como responsável pela ação de puxar ou empurrar foi investigada de forma quantitativa, por Aristóteles, no cerne de sua mecânica. Esse conceito de força correspondia à experiência mais próxima do cotidiano dos gregos naquela época.

No mundo sublunar ocorriam permanentemente fenômenos físicos em que os corpos eram deslocados de seus lugares naturais por meio de movimentos violentos. Quando as causas destes movimentos violentos cessavam, os corpos passavam a realizar movimentos naturais em direção aos seus respectivos lugares naturais. Um

exemplo característico dessa situação é o de uma pedra lançada para cima. Sendo a pedra feita predominantemente do elemento terra, seu movimento natural seria o de cair em direção ao centro do universo, ou seja, a superfície da Terra. Portanto, o movimento de subida, se afastando da superfície da Terra, era um movimento não natural, ou seja, violento. A causa desse movimento não era a essência do corpo (natureza, elemento), mas sim uma causa exterior, a ação de uma força.

Nas ideias de Aristóteles sobre o movimento dos corpos, o meio exerce um papel importante. Sendo sua física, uma física do cotidiano, ou seja, estudavam-se casos observáveis na natureza, ele percebia a influência do meio no movimento dos corpos. Para Aristóteles era impossível um movimento no vazio (vácuo), pois, para ele, sem a resistência de um meio, a velocidade de um corpo em movimento seria infinita.

Uma velocidade infinita implicaria em um movimento instantâneo, o que realmente era inconcebível para Aristóteles. E mais que isso, uma velocidade infinita se associaria à ideia de um universo infinito em sua extensão, que também era inconcebível. Esse era um dos argumentos dele para a inexistência do vácuo, uma crença que predominou durante quase dois milênios em detrimento das doutrinas atomistas, nas quais tudo poderia ser reduzido ao movimento de partículas no vácuo (átomos e vazios).

A partir da análise de movimentos dos corpos, Aristóteles, enunciou uma lei sobre força: a velocidade de um corpo que se desloca num meio é diretamente proporcional à força aplicada ao corpo e inversamente proporcional à resistência do meio. A representação matemática desta lei do movimento só foi elaborada no século XIV. A sua expressão, usando notação matemática atualizada é:

$$v \propto \frac{F}{R} \quad (1)$$

Onde **F** representa a intensidade da força aplicada ao corpo, **R** a resistência do meio em qual ocorre o movimento, e **v** representa a velocidade desse corpo.

A partir da relação (1) podem-se fazer algumas considerações sobre o pensamento aristotélico acerca do assunto: a) Sendo a resistência constante, sob a influência de

uma força constante um objeto se movimenta com velocidade constante; b) A magnitude da velocidade é proporcional à intensidade da força aplicada; c) Para uma resistência constante, um objeto apresenta variação de velocidade quando sobre ele age uma força variável; d) Uma força aplicada a um objeto produz movimento; e) É necessária a presença de um meio para que haja movimento. Não existe o vácuo. (PEDUZZI, 1996 apud CAMARGO, 2000, p.35).

O meio, além de realizar o papel de resistir ao movimento, poderia exercer também um papel favorável ao movimento. Os movimentos dos projéteis foram explicados pelos aristotélicos por meio deste argumento. O exemplo mais usado era o caso de uma pedra lançada, que continuava em movimento mesmo após perder o contato com o agente que a fez entrar em movimento.

O movimento de corpos lançados (projéteis) foi bastante discutido, uma vez que a continuidade do movimento do corpo após o lançamento parecia evidenciar um movimento sem uma causa aparente. A pergunta era: qual era a força responsável pelo deslocamento do projétil depois de cessado o contato com o agente que o lançou?

Para explicar este problema Aristóteles recorreu àquilo que estava em contato com o projétil, o ar (meio). Segundo ele, quando o projétil se movimenta, passa a ocupar o lugar antes preenchido pelo ar que havia em sua direção. O ar, por sua vez, flui em torno do projétil para ocupar o “vazio” deixado pelo mesmo, e ao fazer isto, exerce uma força que impulsiona o projétil. Este processo, no qual o meio é o provedor da força motora, ficou conhecida como *antiperistasis*<sup>4</sup>. O processo era considerado imperfeito, por isso, a força exercida pelo ar diminuía com o deslocamento. A tendência natural do projétil de ir para seu lugar natural predominava após o passar de algum tempo e, desta forma, o corpo caía.

---

<sup>4</sup> O termo *antiperistasis* quer dizer “substituição mútua”. Provavelmente Aristóteles buscou a noção de *antiperistasis* em Platão, em sua teoria da respiração.

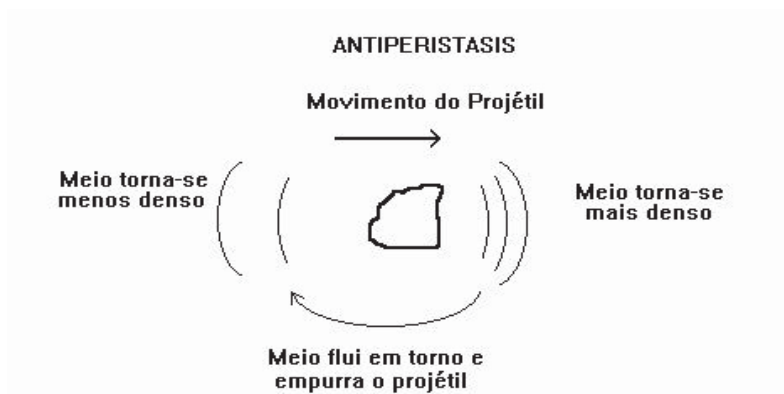


Figura 3: Representação do processo de *antiperistasis* para o movimento violento de um projétil. Retirada de FRANKLIN, 1978 apud PEDUZZI, 2008, p.42.

Podemos perceber que as concepções de Aristóteles eram altamente empíricas. Sendo ele um homem de seu tempo, suas ideias eram baseadas em grande parte nas observações dos fenômenos da natureza. Sabemos hoje que suas concepções foram superadas por outras teorias, mas suas propostas compõem um corpo teórico altamente elaborado, ainda que não matematizado.

O desenvolvimento do conceito de força na ciência grega não ficou restrito as contribuições de Aristóteles, outros pensadores contemporâneos e posteriores a ele deram diversas contribuições para a evolução deste conceito. Podemos citar Arquimedes, o fundador da estática, que estudou a mecânica dos corpos em uma abordagem puramente geométrica.

Com a escola Estóica a história do conceito de força mostrou um novo aspecto, tendo como seu principal pensador Posidônio. Ele tentou explicar o fenômeno das marés utilizando o conceito de “simpatia”, uma concepção de força que chegou muito perto da noção de ação à distância, como concebida pela física clássica nos séculos XVII e XVIII (JAMMER, 2011).

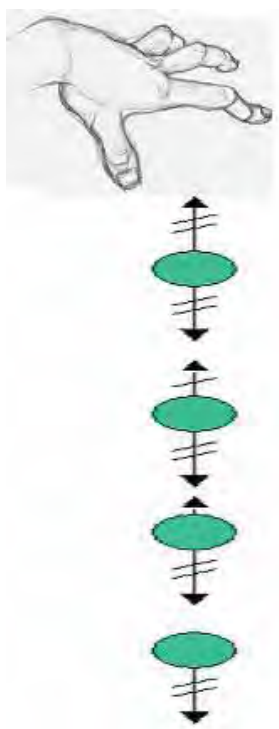
A partir das críticas particularmente concentradas à explicação dada pelos aristotélicos ao movimento dos projéteis, um outro momento importante na história do desenvolvimento do conceito de força começou a se desenrolar, conforme discutiremos a seguir.

## 1.2 Os conceitos de força na ciência pré-clássica – Teorias de força impressa

De maneira geral, a visão aristotélica do universo influenciou de maneira significativa a ciência até a revolução científica ocorrida nos séculos XVI e XVII, mas sabe-se que nem todas essas ideias foram integralmente aceitas por todos.

Há registros que já no século II a.C, o astrônomo Hiparco, de Nicéia (190 a.C – 126 a.C.) não usava os argumentos aristotélicos da *antiperistasis* para explicar o problema do pós-arremesso de um projétil. Para ele o movimento se dava por meio de uma força transmitida ao projétil pelo arremessador. Essa força transmitida pelo arremessador era absorvida pelo projétil e à medida que ele se movimentava ela ia se extinguindo.

Hiparco também usou um argumento bastante parecido com este para explicar o fato dos corpos acelerarem quando postos em queda livre. Considerando um objeto segurado por algo, este não caía por estar sendo segurado, ou seja, sua tendência de ir para baixo era compensada pela força que o segurava. Com o objeto solto, esta força, que antes o segurava, continuava no objeto e ia diminuindo à medida que o corpo ia caindo, chegando a se anular em algum ponto da trajetória. O que explicava o fato de este corpo acelerar era a combinação dessa força com o peso do corpo que permanecia constante.



**Figura 4:** Representação das forças sobre um objeto solto de uma certa altura, segundo Hiparco. Inicialmente a figura representa o momento imediato em que o objeto é solto. Progressivamente a força que equilibra seu peso vai diminuindo até se anular (acompanhar diminuição das setas na parte superior do objeto) e passa a predominar sobre o objeto sua tendência natural de se movimentar para baixo.

Com Hiparco temos a primeira noção de uma força impressa no corpo, elemento novo no que diz respeito à força ao movimento. Diferentemente de Aristóteles, que acreditava que a força que impulsionava o projétil provinha do meio (força externa), a noção de força impressa dizia que a força responsável pelo movimento do projétil era uma força interna, ou seja, estava armazenada no corpo.

Os estudos e as críticas sobre a explicação dos movimentos dos projéteis se estenderam do início do primeiro milênio até a alta Idade Média. O grande número de contribuições dessa época nos revela um período cientificamente rico, pelo menos no campo de estudo dos movimentos, contrariando a ideia de que a Idade Média tenha sido uma época obscura para a ciência.

Em Alexandria, podemos citar outro filósofo que difundiu uma teoria bastante semelhante à teoria de Hiparco, o neo-platônico e comentador da obra de Aristóteles Filoponos (475 – 565) que viveu entre os séculos V e VI de nossa era. Ele rejeitou a teoria aristotélica que associava o meio ao papel motor nos movimentos dos projéteis,



ou seja, era contra a teoria da *antiperistasis*. Para ele, o meio desempenharia somente o papel de resistir ao movimento. Para contestar a *antiperistasis* aristotélica, Filoponos, se expressou da seguinte forma:

Sobre esta suposição seria difícil dizer o que faz o ar, uma vez empurrado adiante, mover-se de volta, isto é, ao longo dos lados da flecha, e depois alcançar a traseira da flecha, voltando uma vez mais e empurrando a flecha adiante. Pois, nesta teoria, o ar em questão deve realizar três movimentos distintos: ele deve ser empurrado para frente pela flecha, então mover-se para atrás e, finalmente, voltar e continuar para frente uma vez mais. Todavia o ar é facilmente movido e, uma vez colocado em movimento, atravessa uma distância considerável. Como então pode o ar, empurrado pela flecha, deixar de mover-se na direção do impulso impresso, mas em lugar disso virar, como por algum comando, e retraçar seu curso? Além disso, como pode este ar, ao virar, evitar de ser disperso no espaço, mas colidir precisamente sobre o entalho final da flecha e novamente empurrar a flecha adiante e presa a ele? Tal visão é inteiramente inacreditável e chega a ser fantástica (EVORA, 1988 apud PEDUZZI, 2008, p. 51).

Tendo contestado o argumento aristotélico de que o meio seria o responsável pela continuidade do movimento violento de um projétil, por meio de uma força motora, Filoponos, de maneira semelhante a Hiparco, explica este movimento dizendo que uma força motriz seria cedida pelo lançador ao projétil, ficando incorporada nele. No exemplo do lançamento de uma flecha, a força motriz cedida pelo arco ficaria incorporada na flecha, fazendo esta continuar seu movimento.

Notemos que Filoponos compartilha da visão aristotélica de que é necessária a presença de uma força para a manutenção do movimento. A velocidade do projétil ou da flecha seria, para Filoponos, proporcional ao saldo entre a força motriz aplicada e a força de resistência oferecida pelo meio. Utilizando uma linguagem matemática moderna, podemos expressar essa lei do movimento de Filoponos, da seguinte maneira:

$$v \propto (F - R) \quad (2)$$

Onde **F** representa a força incorporada pelo corpo (que o desloca), **R** a resistência do meio em qual ocorre o movimento e **v** a velocidade desse corpo.

De acordo com o conceito de força impressa proposto por Filoponos e observando a relação (2) vemos que o movimento no vácuo passa a ser uma

possibilidade, pois sendo a resistência nula, a velocidade não se torna infinita como na relação (1) (lei aristotélica).

Filoponos acreditava que a força incorporada pelo corpo se extinguiu gradualmente mesmo no vácuo, desta forma rejeitando a possibilidade de um movimento infinito mesmo sem ter como mostrar como isso de daria. Ainda sobre a força impressa em um corpo em movimento, Peduzzi (2008) diz que para Filoponos a diminuição da força impressa em um corpo, em um meio qualquer, é atribuída à resistência oferecida pelo mesmo e à tendência natural do corpo, ou seja, sua inclinação em retornar ao seu lugar natural.

Após a decadência de Alexandria, que foi considerada um grande centro científico, a transmissão dos conhecimentos produzidos pelos gregos para o ocidente foi feita principalmente pelos árabes que traduziram as obras dos filósofos gregos da antiguidade. Diversos filósofos islâmicos exerceram um papel importante na preservação das obras dos gregos e na sua introdução na cultura ocidental, sendo expoentes os pensadores Ibn Sina (980 – 1037), Ibn Bajjah (1106 – 1138) e Ibn Rusch (1126 – 1198) que ficaram conhecidos no ocidente como Avicena, Avempace e Averroes, respectivamente. É com estes estudiosos que retorna a discussão sobre a natureza do movimento, a possibilidade de sua ocorrência no vácuo, bem como a noção de força impressa.

É primeiramente com o filósofo Avicena que a ideia de força impressa aparece novamente. Ele discordava da força auto-extinguível de Filoponos, dizendo que a força incorporada pelo corpo no lançamento só se “consume” se o corpo se movimentar por meio de um meio. Uma consequência disso era sua crença na inexistência do vácuo, pois sendo assim, o objeto que no vácuo se deslocasse manteria a força nele incorporada inalterada, desta forma movendo-se indefinidamente. Algo completamente inaceitável.

Para Avicena um objeto lançado horizontalmente se moveria inicialmente em linha reta na direção em que foi lançado. Este movimento em linha reta continuaria até o momento em que a força horizontal, que foi impressa sobre o objeto, fosse

inteiramente gasta. Com o término desta força o corpo cairia em linha reta na direção vertical para baixo, de acordo com sua tendência natural.

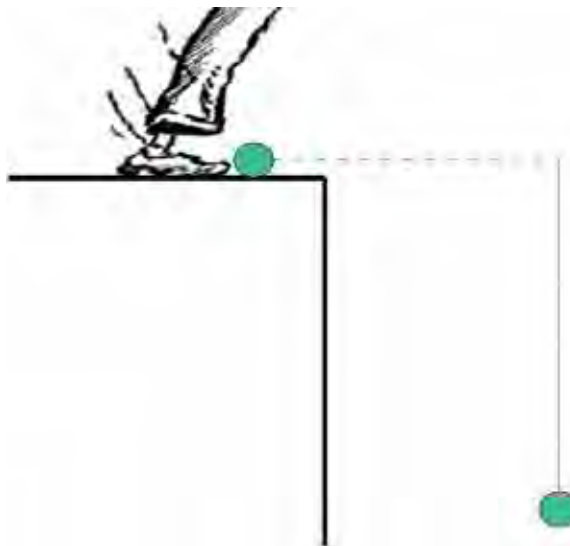


Figura 5: Representação da trajetória de um corpo lançado horizontalmente, segundo a concepção de Avicena.

Foi o árabe Avempace quem mais discutiu as ideias de Filoponos, ele defendeu a relação em que a velocidade é proporcional ao saldo entre a força motriz e a força de resistência [relação (2)]. Avempace também discordou das ideias aristotélicas de *antiperistasis*, assim como sua relação de proporcionalidade inversa entre a velocidade e resistência do meio. Para ele o movimento no vácuo era possível e seria finito, pois mesmo sem resistência o corpo teria uma certa distância finita a percorrer num determinado tempo.

Os trabalhos de Avempace nunca foram traduzidos para o latim, tudo que se sabe de suas contribuições se deve ao terceiro dos filósofos árabes citados, Averroes, um comentador das obras de Aristóteles. Sobre Averroes, Peduzzi (2008, p.54) diz “a ‘lei de movimento’  $v \propto F/R$  é bastante ressaltada por Averroes, que considera o vácuo uma abstração inútil e igualmente destituído de sentido o auto-movimento de um corpo via força impressa”.

Apesar de estar em um contexto em que predominavam as ideias aristotélicas, as concepções de força impressa de Filoponos e Avempace tiveram importantes adeptos do século XIII, sendo eles Tomás de Aquino (1225 – 1274) e Roger Bacon (1214 –

1294). Tomás de Aquino, considerado a mente filosófica mais refinada na Europa desde Santo Agostinho tentou conciliar a filosofia aristotélica com a doutrina da igreja (PIRES, 2008). Ele refutou a ideia do vácuo com o mesmo argumento de Aristóteles, pois o corpo se movendo no vácuo se moveria indefinidamente, mas admitia a tese de um vácuo hipotético, considerando, neste caso, as hipóteses de Avempace sobre a velocidade finita de um corpo se movendo sem resistência.

Alguns trabalhos, como os realizados por Francisco de Marchia (1290 – 1344), Jean Buridan (1297 – 1358) e Nicolau Oresme (1320 – 1382), realizados em torno dos séculos XIII e XIV, deslocaram o enfoque das discussões do “porquê” para o “como” e mudaram a forma de encarar o problema.

A força impressa foi retomada por Francisco de Marchia, que propôs uma versão na qual a força impressa incorpórea era uma força temporária e auto-dissipativa. Nesse processo o ar continuava a exercer um papel importante, pois quando um corpo era posto em movimento, o ar em torno recebia também uma força impressa que ajudaria no movimento do corpo.

Os trabalhos de Francisco de Marchia podem ter influenciado o professor da Universidade de Paris no século XIV, Jean Buridan, no desenvolvimento de sua teoria de força impressa. Com ele, chegamos na mais bem elaborada teoria sobre força impressa, a teoria medieval do *impetus*. Esta teoria se parece muito com a noção de força impressa de Filoponos, mas, ao que se sabe, Buridan desconhecia seu trabalho.

Assim como Avicenna, Buridan associava à ideia de força impressa uma qualidade de permanência, sustentando que o *impetus* impresso deveria se conservar infinitamente, a menos que fosse corrompido por uma resistência externa<sup>5</sup> (NEVES, 2000). Portanto, o *impetus* de Buridan seria uma força motriz incorpórea, passada de um motor inicial ao corpo colocado em movimento, que permanecia no corpo caso este não fosse afetado pela resistência do meio ou pela gravidade, aqui entendida como a tendência natural de se dirigir para seu lugar natural.

Buridan usou sua teoria do *impetus* para criticar a explicação que a física aristotélica para o movimento de projéteis. Em suas explicações, Buridan, utilizou

---

<sup>5</sup> Interessante notar a noção de *cessant causa cessat effectus*, ou seja, cessada a causa cessa-se o efeito. Como as ideias aristotélicas foram influentes no decorrer da história.

exemplos extraídos da experiência cotidiana para contradizer a ideia de que o ar seria o responsável para dar força motora necessária para o projétil continuar em movimento. Um dos exemplos utilizados por Buridan, segundo Peduzzi (2008), foi o caso de um pião que, ao girar, não muda sua posição. Essa observação permitiu a ele criticar a *antiperistasis*, já que, segundo esta, só é possível o movimento de um corpo, se o que o move passa a ocupar o lugar deixado pelo corpo, assim impedindo a formação do vazio.

Outro exemplo que Buridan usou para discutir esta questão foi o caso de uma embarcação que sendo impulsionada continua a se mover contra a corrente de um rio, mesmo depois que o impulso cessa. Sendo o deslocamento contra a corrente, a força responsável pelo movimento teria de ser fornecida, segundo Aristóteles, pelo ar.

[...] um marinheiro sobre o convés não sente qualquer ar atrás dele empurrando-o. Ele sente somente o ar da frente resistindo (a ele). Além disso, supondo que o navio mencionado estivesse carregado com grãos ou madeira e um homem estivesse situado atrás da carga, então, se o ar tem um tal impetus capaz de empurrar o navio adiante, o homem seria empurrado muito mais violentamente entre aquela carga e o ar atrás dela (EVORA, 1988 apud PEDUZZI, 2008, p. 55).

Partindo destes exemplos, assim como de outros argumentos, Buridan é levado a concluir que

[...] nós podemos e devemos dizer que em uma pedra ou em outro projétil há algo impresso que é a força motriz ("virtus motiva") daquele projétil. E isto é evidentemente melhor do que recorrer à afirmação que o ar continua a mover aquele projétil. Pois o ar parece mais resistir. Portanto, parece-me que deve ser dito que o motor, ao mover um corpo móvel, imprime um certo "impetus", ou uma certa força motriz ("vis motiva") ao corpo móvel [no qual age o "impetus"] na direção para o qual o motor estava movendo o corpo móvel, para cima ou para baixo ou lateralmente ou circularmente. Quanto mais rapidamente o motor mover aquele corpo móvel, mais forte será o "impetus" que ele lhe imprimirá. É por esse impetus que a pedra é movida depois que o atirador para de movê-la. Porém esse "impetus" é continuamente reduzido pela resistência do ar e pela gravidade da pedra, que a inclina em uma direção contrária àquela à qual o "impetus" estava naturalmente predisposto a movê-la. Assim o movimento da pedra torna-se continuamente mais lento, e finalmente esse impetus diminuí tanto que a gravidade da pedra o vence e move a pedra para baixo, para o seu lugar natural (ÉVORA, 1988, apud PEDUZZI, 2008, p. 55).

A figura 6 mostra uma representação de um lançamento de um corpo, segundo a teoria do *impetus*.

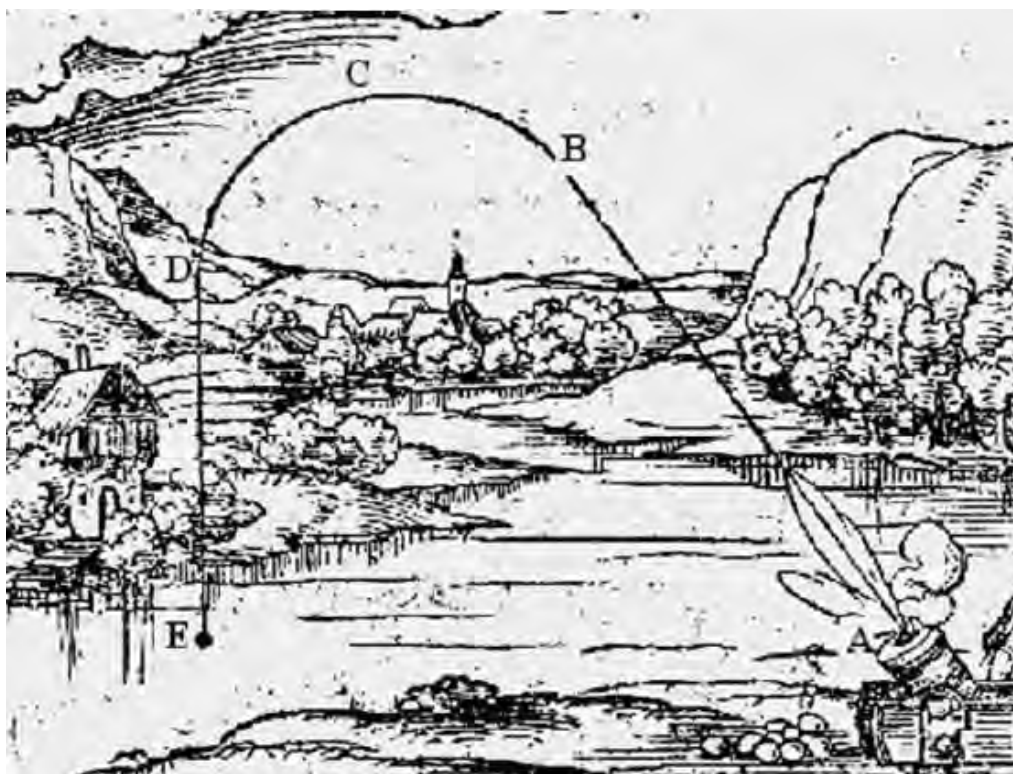


Figura 6: Representação da trajetória de um corpo em lançamento segundo a teoria do *impetus* de Buridan. Inicialmente o *impetus* transferido ao corpo é superior ao seu peso (trecho AB). Esse *impetus* inicial vai sendo corrompido (decréscimo do *impetus*) por uma força externa (trecho BCD), neste caso a resistência do ar e a tendência natural do corpo de cair (peso). Esgotando-se o *impetus* o corpo cai verticalmente (trecho DE). Figura extraída de <http://www.yorku.ca/lbianchi/nats1800/lecture16a.html>.

No momento em que o corpo é lançado, ele adquire um *impetus* que é transferido pelo lançador no momento do lançamento. O *impetus* do corpo vai diminuindo com o tempo, com a ação da força resistiva do ar e com a tendência natural do corpo de cair verticalmente (peso). Vindo a parar somente quando o *impetus* é vencido por essas forças externas.

Ao caracterizar seu conceito de forma quantitativa Buridan considerou a velocidade e a quantidade de matéria de um corpo como sendo a medida da força do *impetus* que produzia o movimento. Sabendo que em um corpo mais denso havia mais matéria que em um corpo mais rarefeito, de mesmo volume e de mesma forma, Buridan dizia que se um pedaço de metal e um pedaço de madeira de formas e volumes idênticos fossem postos à mesma velocidade, o corpo de metal alcançaria uma maior distância, devida a maior quantidade de matéria, que poderia receber mais

*impetus* e perdurar por mais tempo contra as forças resistivas. É interessante destacarmos que Buridan chegou muito próximo do conceito de momento da física clássica ( $p = mv$ ), considerando as diferenças ontológicas entre os dois conceitos. O conceito de momento newtoniano expressa uma quantidade de movimento enquanto que o *impetus* era entendido como a causa do movimento.

Outra contribuição importante de Jean Buridan foi sua explicação para o movimento acelerado dos corpos em queda. Para ele a variação da velocidade estava associada ao *impetus* que crescia no decorrer da queda. Inicialmente, o corpo se move (cai) devido ao seu peso (tendência natural) e a ação da resistência do ar, sendo sua velocidade constante. Com a continuidade da queda, o corpo vai adquirindo um determinado *impetus* devido ao seu próprio movimento e, com isso, aumenta a velocidade. Sob a ação da gravidade e do *impetus* crescente, o corpo acelera em sua queda (PEDUZZI, 2008).

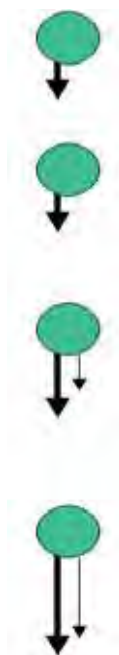


Figura 7: Representação do movimento de queda de um corpo segundo a concepção de Buridan. No início da queda a velocidade do corpo, representada pelas setas largas, é constante, variando posteriormente. As setas finas representam o *impetus* no corpo.

Outro pensador que contribuiu de maneira significativa para as teorias de força impressa foi um estudante orientado por Buridan, Nicolau Oresme. Enquanto que o *impetus*, para Buridan, só podia ser esgotável por forças externas, para Nicolau

Oresme o *impetus* adquirido por um corpo era auto-consumível. Outra peculiaridade da concepção de Nicolau Oresme era sua aceitação da possibilidade do movimento no vácuo, pois sendo o *impetus* auto-consumível, para ele, o movimento seria necessariamente finito, ocorrendo ou não no vácuo.

A teoria do *impetus* de Buridan e de Nicolau Oresme foi bastante abrangente na física medieval, tanto que a noção de *impetus* foi utilizada por Buridan para explicar o movimento dos corpos celestes. Segundo ele, seria aceitável a ideia de que o movimento circular eterno dos astros se dava por um *impetus* transferido aos astros no início da criação. Interessante notar mais uma vez as fortes influências dogmático-teológicas da época.

Em parte alguma da Bíblia se lê que existem inteligências encarregadas de transmitir às esferas celestes seus movimentos próprios; assim, é lícito mostrar que não é necessário presumir a existência de tais inteligências. Podemos dizer que Deus, ao criar o Universo, moveu cada um dos orbes celestes como desejou; deu a todos um ímpeto que os manteve em movimento desde então [...] (BURIDAN apud JAMMER, 2011, p. 97).

Compartilhando desta mesma concepção, Nicolau Oresme disse a respeito dos movimentos dos céus:

[...] quando Deus criou (os céus) [...] Ele os imprimiu com uma certa qualidade ou força de movimento, assim como Ele imprimiu as coisas terrestres com peso [...]; é exatamente o mesmo de um homem que constrói um relógio e o deixa andar por si próprio. Assim Deus deixou os céus se moverem continuamente [...] de acordo com a ordem (por Ele) estabelecida (KUHN, 1990 apud PEDUZZI, 2008, p.60).

Os argumentos usados por Buridan e Nicolau Oresme para os movimentos dos céus mostram o início do caminho para a unificação dos fenômenos terrestres e celestes em um conjunto de leis, mesmo sabendo que este direcionamento certamente não foi feito com estas intenções. Mas o que é certo, é que realmente abriu o caminho para o rompimento da dicotomia aristotélica entre o mundo sublunar e o mundo supralunar.

Diversos outros autores posteriores a Buridan deram suas contribuições à teoria do *impetus*, embora sugerindo poucas variações. Entre eles destacamos: Alberto da Saxônia (1316 – 1390), Leonardo da Vinci (1452 – 1519), Niccolo Fontana Tartaglia



(1500 – 1557) e Giambattista Benedetti (1530 – 1590). Dada sua importância a dinâmica do *impetus* foi utilizada em diversas escolas durante os séculos XV e XVI. A teoria do *impetus* serviu de base para a formação de Galileu Galilei que a utilizou em seus primeiros trabalhos. A figura de Galileu Galilei se destaca como outro grande expoente na evolução do conceito de força por ser ele o grande responsável pela ligação da dinâmica do *impetus* e a dinâmica inercial.

### 1.3 Os primórdios da mecânica clássica – Uma nova visão de mundo

Os séculos XVI e XVII foram palco de profundas alterações no campo da astronomia e da dinâmica, essas alterações não ocorreram apenas paralelas no tempo, mas também interligadas. As questões relacionadas à dinâmica tratavam da física da força impressa, discutida anteriormente, e as transformações no campo da astronomia tratavam de uma polêmica antiga, a respeito do modelo aristotélico-ptolomaico.

Após muito tempo vieram as críticas ao modelo de epiciclos proposto por Cláudio Ptolomeu (90 d.C. – 168 d.C.) no segundo século da era cristã, em sua obra *Almagesto*<sup>6</sup>. Muitos passaram a questionar o modelo ptolomaico. Conforme o *Almagesto* se tornava cada vez mais claro e compreensível, abria-se à perspectiva de novas críticas, ou seja, se tornava com o passar do tempo, cada vez mais vulnerável a contestações. Mas o sistema astronômico que desencadeou um processo de ruptura com o conhecimento até então estabelecido, foi proposto por Nicolau Copérnico (1473 – 1543) em sua obra *De revolutionibus orbium caelestium* (Sobre a revolução das esferas celestes), publicada em 1543, no ano de sua morte.

Nesta obra, Copérnico apresentou um modelo astronômico estruturado matematicamente que foi adequado para rivalizar com o modelo que há tanto tempo era aceito. Em linhas gerais, sem adentrar muito nos detalhes do modelo, podemos

---

<sup>6</sup> *Sintaxis Mathematica*, o *Almagesto*, como ficou conhecido, é um tratado matemático no qual Ptolomeu propõe uma teoria completa, coerente e com amplo poder preditivo, sobre o movimento da Lua, do Sol e dos planetas. Sua astronomia é compatível com a doutrina aristotélica de uma Terra imóvel e referencial para todos os movimentos.

dizer que seu modelo discordava do sistema geocêntrico de Ptolomeu, considerando-o um sistema muito complicado e pouco satisfatório.

Para Copérnico a maior parte dos problemas do modelo ptolomaico poderia ser resolvida removendo a Terra de sua posição central e substituindo-a pelo Sol. Em sua tese, o Sol se encontrava no centro do universo e todos os corpos celestes giravam ao seu redor em órbitas circulares, inclusive a Terra, que por sua vez girava sobre si diariamente. A finitude do universo foi conservada por Copérnico, sendo seu limite a esfera das estrelas fixas, como se pode observar na figura 8. Importante ressaltar que o modelo copernicano, apesar de avançar muito com relação ao ptolomaico, ainda possuía um certo grau de complexidade. No modelo de Copérnico ainda havia a necessidade de epiciclos e deferentes<sup>7</sup>, mas com um número menor com relação ao modelo de Ptolomeu<sup>8</sup>.

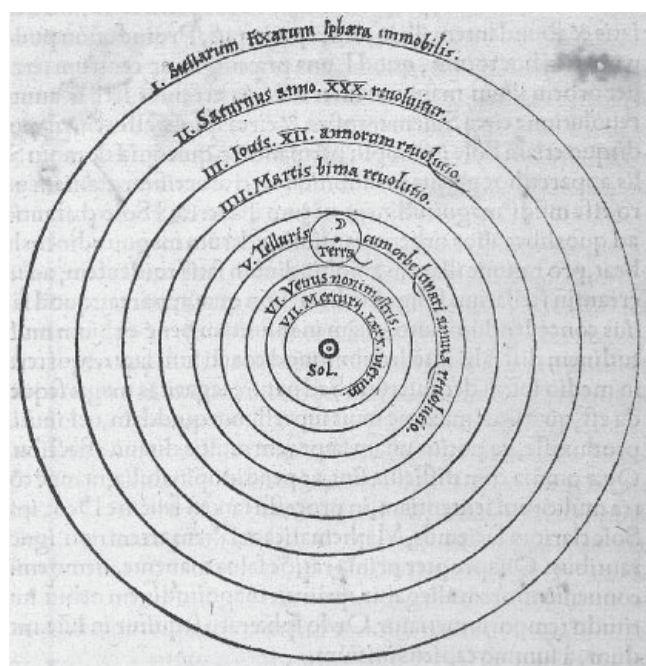


Figura 8: Representação simplificada do modelo de heliocêntrico de Copérnico. (Figura extraída de <http://www.ras.org.uk/library/images/1100-ras-photographic-archive-online>).

<sup>7</sup> Epiciclos são círculos em que os planetas se movem ao longo dele. O centro do epiciclo se move em um círculo maior chamado deferente.

<sup>8</sup> A afirmação de que o modelo de Copérnico continha um número menor de epiciclos e deferentes é feita pela maioria dos autores, mas não é uma opinião unânime.

Do ponto de vista físico, o principal problema do modelo copernicano era explicar por que os corpos na superfície da Terra acompanhavam o seu movimento. Há muito tempo já se questionava o movimento da Terra pelo fato de que as nuvens, os pássaros, e tudo que estivesse imerso no ar deveria ficar para trás. Assim com um corpo solto do alto de uma torre, deveria cair à oeste da torre e não junto à base da mesma como se observava.

Para Copérnico este problema não era prioritário, sua explicação era que tudo de certa forma, estava de algum modo ligado à Terra. Copérnico introduz nesse argumento o princípio de que o objeto compartilha o movimento natural da Terra, logo o movimento desta não será perceptível para ele, ou seja, para ele é como se a Terra estivesse imóvel e a queda em direção ao centro ocorresse da mesma maneira que ocorreria em um universo geocêntrico. Uma explicação mais revolucionária, a respeito dessas questões, foi dada por Galileu Galilei (1564 – 1642).

Galileu permaneceu atrelado às influências medievais das teorias de força impressa. Em um tratado realizado no início de sua carreira *De motu* (Do movimento) considerou necessária a associação de uma força a um objeto em movimento para que esse continuasse em movimento. Contrariou Aristóteles quanto ao papel do meio nas suas explicações sobre o movimento de um projétil. Explicou a continuidade do movimento, depois de cessado o contato com o lançador, utilizando a ideia de uma força impressa.

Para Galileu, no lançamento de um corpo para o alto, imprime-se ao corpo uma espécie de qualidade ou virtude (força). É como se o corpo adquirisse uma leveza, uma vez que a virtude de subir era própria dos corpos leves. Quando diminui essa força, o corpo desacelera em direção ao alto, até que sua força impressa se equilibre com seu peso e, a partir daí, o corpo começa a cair de forma acelerada. A aceleração é resultado da diferença do peso do corpo e a diminuição da força impressa. Do ponto de vista teórico, se o corpo caísse de uma altura suficientemente grande, toda a força impressa desapareceria em algum momento da queda, a partir do qual o corpo cairia com velocidade uniforme, sob ação do próprio peso.

Galileu dá os primeiros passos no sentido da construção de uma física matemática, uma física arquimediana, como diz Koyré (1986). A lei da queda dos corpos é a primeira lei física que Galileu tenta obter, com base no “método arquimediano”.

Ele passou da abordagem com base na força impressa para uma abordagem cinemática, onde ele, inicialmente, em uma carta a Paolo Sarpi, no ano de 1604, Galileu admitiu que a velocidade de um corpo em movimento de queda era proporcional à distância percorrida (PEDUZZI, 2008, p.128). Como representado pela relação.

$$v \propto d \quad (3)$$

Já nos *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze* (Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências) reformulou sua consideração anterior e chegou na relação aceita atualmente, em que a velocidade é proporcional ao tempo.

$$v \propto t \quad (4)$$

Com o desenvolvimento de seus estudos sobre o movimento, Galileu chegou à conclusão que a queda dos corpos se dava de forma acelerada em todo o trajeto e não apenas em parte dele, como ele havia expressado anteriormente em suas primeiras obras. Ao considerar que esse aumento da velocidade do corpo em queda livre se dava de maneira constante no decorrer do tempo, ou seja, aceleração constante, Galileu escreveu:

Quando, portanto, observo uma pedra que cai de uma certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples do que aquele que sempre se repete da mesma maneira. O que entenderemos facilmente, se considerarmos a estrita afinidade existente entre o corpo e o movimento: do mesmo modo, com efeito, que a uniformidade do movimento se define e se concebe com base na igualdade dos tempos e dos espaços (com efeito, chamamos movimento uniforme ao movimento que em tempos iguais percorre espaços iguais), assim também, mediante uma divisão de tempo em partes iguais, podemos perceber que os aumentos de velocidade acontecem com simplicidade; concebemos no espírito que um movimento é uniformemente acelerado quando, em tempos iguais quaisquer,

adquire aumentos iguais de velocidade (GALILEI, 1935 apud PEDUZZI, 2008, p.128).

Outra consideração importante feita por Galileu foi admitir que dois corpos, independentemente de seus formatos e do que são constituídos, quando soltos de uma mesma altura atingem o solo ao mesmo tempo. Condicionando essa situação ao caso de não haver nenhuma resistência ao movimento dos corpos (resistência do ar). Com isso ele se posicionou de forma contrária ao princípio aristotélico da impossibilidade de um movimento no vazio.

Galileu foi também um dos precursores do conceito de inércia. Em sua obra *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo: tolemaico e copernicano* (Diálogos Sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo: Ptolomaico e Copernicano) ele apresentou argumentos importantes sobre a persistência inercial do movimento.

Por meio de um diálogo<sup>9</sup> entre seus personagens, Salviati (representante do novo pensamento científico, o copernicanismo) e Simplicio (representante do pensamento aristotélico), Galileu discutiu a questão da continuidade do movimento. Salviati propôs a questão de como se daria o movimento de uma esfera, livre de resistências, sobre um plano inclinado. Conforme a experiência, o movimento de subida do corpo sobre o plano inclinado se daria de forma desacelerada, até o momento em que pararia (movimento contrário a sua tendência natural). No movimento de descida do corpo sobre o plano inclinado, o movimento seria acelerado indefinidamente (movimento coincidente com sua tendência natural). Salviati – verbalizando o pensamento do próprio Galileu - apresenta suas conclusões respondendo a questão: como seria o movimento da esfera sobre um plano horizontal? O movimento do corpo seria sem diminuição nem aumento da velocidade, desta forma persistindo indefinidamente.

**Salviati:** - Não desejo que digais ou respondais nada saber a não ser aquelas coisas que seguramente sabeis. Por isso, dissei-me: quando tivesses uma superfície plana, polidíssima como um espelho e de matéria dura como o aço, e que não fosse paralela ao horizonte, mas um pouco inclinada, e sobre o qual se colocasse uma bola perfeitamente esférica e de matéria pesada e duríssima, como, por exemplo, de

---

<sup>9</sup> A obra “Diálogos Sobre os Dois Máximos Sistemas do Mundo: Ptolomaico e Copernicano” é constituída de um diálogo em quatro jornadas, entre três personagens, Sagredo, Salviati e Simplicio, o diálogo representa uma defesa do sistema copernicano.

bronze, deixada em liberdade, o que acreditais que ela faria? Não acreditais (assim como eu) que ela ficasse parada?

**Simplicio:** - Se aquela superfície fosse inclinada?

**Salviati:** - Sim, porque assim o supus.

**Simplicio:** - Não acredito de modo algum que ela ficasse parada; ao contrário, estou perfeitamente seguro de que ela se moveria espontaneamente na direção do declive. [...]

**Salviati:** - Mas se outros quiserem que aquela bola se movesse para cima sobre aquela mesma superfície, acreditais que ela subirá?

**Simplicio:** - Espontaneamente não, mas só arrastada ou lançada com violência.

**Salviati:** - E quando ela fosse impelida por algum ímpeto que lhe fosse violentamente impresso, qual e quanto seria o seu movimento?

**Simplicio:** - O movimento iria sempre enfraquecendo e retardando-se, por ser contra a natureza, e seria mais demorado ou mais breve, segundo o maior ou menor ímpetus e segundo o maior ou menor aclive.

**Salviati:** - Parece-me, portanto, até aqui, que vós me haveis explicado os acidentes de um móvel sobre os dois planos diferentes; e que no plano inclinado o móvel pesado espontaneamente desce e vai continuamente acelerando-se, e, que, para retê-lo em repouso, é necessário usar força; mas sobre o plano ascendente é necessário força e também para pará-lo, e que o movimento que lhe foi impresso vai continuamente enfraquecendo, até que finalmente se anula. Dizeis ainda mais que em um e em outro caso nasce uma diferença dependendo de se a declividade ou aclividade do plano for maior ou menor; de modo que a uma inclinação maior corresponde uma maior velocidade e, ao contrário, sobre o plano em aclive o mesmo móvel lançado pela mesma força move-se uma distância maior quanto menor seja a elevação. Dizei-me agora o que aconteceria com o mesmo móvel sobre uma superfície que não estivesse nem em aclive nem em declive.

**Simplicio:** - [...] Como não existe declividade, não pode existir uma inclinação natural ao movimento e, não existindo aclividade, não pode existir resistência a ser movido, de modo que seria indiferente à propensão e à resistência ao movimento: parece-me, portanto, que lhe deveria ficar naturalmente em repouso.

**Salviati:** - Assim acredito, quando alguém o colocasse parado; mas se lhe fosse dado um ímpeto em direção a alguma parte, o que aconteceria?

**Simplicio:** - Continuará a mover-se na direção daquela parte.

**Salviati:** - Mas com que espécie de movimento? Por um movimento continuamente acelerado, como nos planos em declive, ou por um movimento sucessivamente retardado, como nos aclives?

**Simplicio:** - Eu não consigo perceber causa de aceleração nem de retardamento, não existindo nem declividade nem aclividade.

**Salviati:** - Sim. Mas se não existisse causa de retardamento, muito menos deveria existir de repouso: quanto acreditais, portanto, que duraria o movimento do móvel?

**Simplicio:** - Tanto quanto durasse o comprimento daquela superfície que não é nem subida nem descida.

**Salviati:** - Portanto, se esse espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente sem fim, ou seja, perpétuo?

**Simplicio:** Parece-me que sim, sempre quando o móvel fosse de matéria duradoura.

(GALILEI apud PORTO e PORTO, 2009, p. 6-7).



Figura 9: Esquema da experiência de pensamento proposta por Galileu. (Retirada de GONZATTI, SARAIVA e RICCI, 2008, p. 14).

Desta forma, ficou claro a ideia de inércia nos Diálogos, como sendo a continuidade do movimento, sem variação da velocidade.

Entretanto, se observarmos cuidadosamente este argumento, veremos que um plano horizontal seria tangente à superfície da Terra, ou seja, um movimento sobre este plano seria um movimento contrário a sua tendência natural e, conseqüentemente, deveria ser desacelerado. Desta forma, um movimento com velocidade constante, seria aquele que nem se aproxima do centro da Terra e nem se afasta, ou seja, um movimento que descreve um arco de circunferência concêntrico à Terra. Portanto, a descrição de inércia para Galileu era de uma inércia do tipo circular, forma diferente da concepção que temos hoje.

Como podemos observar, Galileu estudou principalmente os aspectos cinemáticos do movimento, não se preocupando em explicar o conceito de força em si. Mesmo sem essa intencionalidade, Galileu, no trecho acima, já deixou subentendida a ideia de força constante. Nos “Discursos e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências” ele deixou claro sua despreocupação em investigar as causas do movimento.

O presente não parece ser o momento apropriado para investigar a causa da aceleração do movimento natural. Muitas opiniões foram expressas a esse respeito por vários filósofos. Alguns explicaram pela atração para o centro; outros, pela repulsa entre as partes muito pequenas do corpo; outros, ainda, a atribuíram a uma tensão no circundante, que se aproxima por trás do corpo cadente e o impele de uma de suas posições para outra. Todas essas fantasias, e outras, devem ser examinadas,

mas não vale realmente a pena. Por ora, nosso propósito é investigar e demonstrar algumas propriedades do movimento acelerado (seja qual for a causa da aceleração) (GALILEI, 1638 apud JAMMER, 2011, p.129).

Galileu considerava que a força, antes de tudo era um conceito físico e não metafísico, e acreditava que sua abordagem estava ainda no início, sendo a definição de força deixada para outros pensadores, admitindo que estava fora de seu alcance (JAMMER, 2011).

A ideia de inércia não foi enunciada claramente como conhecemos hoje por Galileu e foi o filósofo francês René Descartes (1596 – 1650) que expressou de forma clara a concepção de inércia. Para Descartes o conhecimento se dava de forma dedutiva, a partir de ideias claras do intelecto humano e não por meio de observações de experiências. Em sua obra “Princípios de Filosofia” ele estabeleceu os princípios de sua física e, entre outras coisas, buscou a explicação da persistência do movimento.

Em sua primeira lei da natureza ele disse que qualquer coisa perseverava sempre no mesmo estado, e, portanto qualquer coisa uma vez em movimento continuava sempre a se mover. Na segunda lei da natureza, ele disse que todo movimento, por si mesmo, somente é retilíneo.

Como Deus não está sujeito a mudanças, agindo sempre da mesma maneira, podemos chegar ao conhecimento de certas regras a que chamo as leis da natureza, e que são as causas segundas, particulares, dos diversos movimentos que observamos em todos os corpos, e daí a importância dessas leis. A primeira é que cada coisa particular, enquanto simples e indivisa, se conserva o mais possível e nunca muda a não ser por causas externas. Por conseguinte, se uma parte da matéria é quadrada, ela permanecerá assim se nada vier a alterar a sua figura; e se estiver em repouso, nunca se moverá por si mesma. Mas, uma vez posta em andamento, também não podemos pensar que ela pode deixar de se mover com a mesma força enquanto não encontrar nada que atrase ou detenha o seu movimento. De modo que, se um corpo começou a mover-se, devemos concluir que continuará sempre em movimento, e que nunca parará por si próprio.

[...]

A segunda lei que observo na natureza é que cada parte da matéria, considerada em si mesma, nunca tende a continuar o seu movimento em linha curva mas sim em linha reta, embora muitas dessas partes sejam muitas vezes obrigadas a desviar-se porque encontram outras no caminho, [...] Embora seja verdade que o movimento não acontece num instante, todavia é evidente que todo o corpo que se move está determinado a mover-se em linha reta e não circularmente (DESCARTES, apud PORTO e PORTO, 2009, p. 8).

Desta forma, Descartes forneceu os alicerces para este novo princípio físico (princípio da inércia), que seria consolidado posteriormente na mecânica newtoniana.



Descartes, também elaborou uma teoria para a explicação dos movimentos celestes, a teoria dos vórtices de éter. A teoria dos vórtices era puramente de natureza cinemática (JAMMER, 2011). Por não acreditar em qualquer teoria de ação à distância, postulou um universo repleto de corpúsculos, se movimentando em vórtices. Com essa teoria Descartes explicou também o fenômeno da gravitação.

A gravitação para Descartes era o movimento descendente de matéria terrestre, ou seja, os corpos terrestres eram pressionados para o centro do vórtice (Terra) pelos corpúsculos etéreos que flutuavam no turbilhão.

Agora, porém, desejo que considereis o que é a gravitação desta Terra, ou seja, a força que une todas as partes dela e faz todas tenderem para seu centro, conforme cada qual seja mais ou menos volumosa e sólida, o que nada mais é do que apenas isto: que as partes do pequeno espaço celeste que a cerca, girando muito mais depressa do que as partes dela em torno de seu centro, também tendem com muito mais força a se afastar dela e, por conseguinte, a empurrá-las de volta para lá (DESCARTES, apud JAMMER, 2011, p. 139).

A teoria de Descartes para a gravitação não foi muito aceita fora da França, foi considerada por muitos o ponto mais fraco da física cartesiana, antes mesmo do advento da gravitação universal newtoniana. Mas, sem dúvida, foi um dos primeiros esquemas conceituais a unir a gravitação terrestre e o movimento dos planetas.

#### **1.4 O conceito de força na mecânica newtoniana**

A consolidação da perspectiva inercial do movimento e da mecânica necessária para explicar os fenômenos terrestres e celestes, de maneira unificada, se deu com a publicação do trabalho de Isaac Newton (1643 – 1727), denominado *Philosophiae naturalis principia mathematica* (Princípios Matemáticos de Filosofia Natural). Nessa obra, Newton arquitetou uma exposição dedutiva e sistemática da mecânica clássica. Nos *Principia*, nota-se que o conceito de força para Newton estava atrelado ao seu intenso estudo da gravitação, tendo em vista que sua maior preocupação, na época, era descrever matematicamente os fenômenos planetários.

Logo no início da obra, Newton definiu alguns conceitos fundamentais para a mecânica, como: quantidade de matéria (massa), quantidade de movimento, inércia, força centrípeta, tempo absoluto e relativo, espaço absoluto e relativo, movimentos

absolutos e relativos. Vejamos como Newton (2008, p. 39 – 43) apresentou suas definições:

“Definição I: A quantidade de matéria é a medida da mesma, obtida conjuntamente a partir de sua densidade e volume”.

“Definição II: A quantidade de movimento é a medida do mesmo, obtida conjuntamente a partir da velocidade e da quantidade de matéria”.

“Definição III: A vis ínsita, ou a força inata da matéria, é um poder de resistir, através do qual todo o corpo, no que depende dele, mantém seu estado presente, seja ele de repouso ou de movimento uniforme em linha reta”.

“Definição IV: Uma força imprimida é uma ação exercida sobre um corpo a fim de alterar seu estado, seja de repouso, seja de movimento uniforme em uma linha reta”.

“Definição V: Uma força centrípeta é aquela pela qual os corpos são dirigidos ou impelidos, ou tendem, de qualquer maneira, para um ponto ou centro”.

“Definição VI: A quantidade absoluta de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à eficácia da causa que a propaga a partir do centro, através dos espaços ao seu redor”.

“Definição VII: A quantidade acelerativa de uma força centrípeta é a medida da mesma, proporcional à velocidade que ela gera em um dado tempo”.

“Definição VIII: A quantidade motora de uma força centrípeta é a medida da mesma proporcional ao movimento que ela gera em um dado tempo”.

Na definição I, a quantidade de matéria aparece como o produto da densidade pelo volume (não foi definido previamente o conceito de densidade, partiu-se do princípio que a densidade era um conceito já conhecido). A respeito do produto entre volume e densidade, Jammer (2011) considera que provavelmente Newton tenha recordado das experiências de Robert Boyle com gases comprimidos, pois, nessas experiências, a quantidade de gás sob pressão variável era determinada pelo produto do volume por sua densidade.

Em seu comentário sobre a definição de quantidade de matéria, Newton (2008, p. 39) escreveu: “[...] É essa quantidade que doravante sempre denominarei pelo nome de corpo ou massa. E a mesma é conhecida por meio do peso de cada corpo, pois é proporcional ao peso, como descobri com experimentos com pêndulos [...]”. Importante ressaltar que, nos *Principia*, a diferença entre os conceitos de massa e peso não foi estabelecida de maneira explícita, isso somente foi feito no século seguinte em trabalhos de outros.

Na definição II, ele define quantidade de movimento, ou momento linear, como sendo proporcional à velocidade. Sendo o conceito de quantidade de matéria uma ideia básica de seu sistema, propôs que a quantidade de movimento era o produto da massa (quantidade de matéria) pela velocidade.

Tomando como base as duas primeiras definições, juntamente com os trabalhos sobre o princípio de inércia de Galileu, Newton tratou, pela primeira vez em sua obra, do conceito de “força” propriamente dito. Na definição III define *vis insita* (força inata), ou seja, a natureza inerte da matéria, como uma força de inatividade, como um poder resistivo à mudança no estado de movimento. Para Newton, a inércia é uma força inerente à matéria e latente até quando não existir qualquer outra força aplicada ao corpo. Podemos notar que nesta definição a força não foi concebida como uma causa do movimento, mas como a qualidade da inércia. Sobre isto, Jammer comenta:

A resposta se torna clara se encararmos a definição III como uma concessão à mecânica pré-galileana. Como vimos, a mecânica peripatética concebia a força [dynamis] como tendo uma natureza dupla, ativa na medida em que afetava os outros objetos, passiva na medida em que era susceptível a mudanças externas. Essa conotação passiva fornece a resposta (JAMMER, 2011, p. 158).

Contrastando com a força inata, a definição IV dos *Principia* refere-se à força imprimida, ou seja, uma força aplicada. Podemos notar que a noção de força imprimida de Newton, como uma mudança do estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme, está intimamente ligada ao seu princípio metafísico de causalidade. Jammer, destaca três aspectos que diferenciam a força imprimida e a força inata:

A força imprimida é pura ação e tem caráter transitório; segundo, ela não permanece no corpo depois que a ação é concluída; por último, enquanto a inércia, na visão newtoniana, era uma força universal da matéria, a força imprimida podia ter origens diferentes, “provindo da percussão, da pressão ou da força centrípeta” (JAMMER, 2011, p. 159)

No caráter efêmero desta força impressa, Newton dá a impressão de manter, em sua mente, a ideia escolástica de *cessant causa cessat effectus* (JAMMER, 2011).

Na definição V, Newton insere o terceiro tipo de força, a *vis centrípeta* (força centrípeta), correspondente as forças do tipo central. Jammer (2011) considera que a

força centrípeta era para Newton mais importante que as outras. Newton, em seus comentários sobre a definição V, começa da seguinte forma: “São forças desse tipo: a gravidade, pela qual os corpos tendem para o centro da Terra (...)” (NEWTON, 2008, p.41). As definições VI, VII e VIII trazem conceitos relacionados com a força centrípeta, sendo eles a força centrípeta absoluta, força centrípeta aceleradora e força centrípeta motriz.

Analisando as definições dos *Principia*, nota-se que o conceito de força aparece de certa forma como um conceito impreciso, Newton não o define precisamente em nenhum momento. As considerações feitas pelo autor dos *Principia*, com relação ao conceito de força, estão relacionadas com os estudos sobre a gravitação e a dinâmica dos movimentos dos planetas.

Após as definições, Newton apresenta seus três axiomas para o movimento dos corpos, as famosas três leis de Newton.

Lei I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele.

Lei II: A mudança de movimento é proporcional a força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida.

Lei III: A toda ação há sempre uma reação igual ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas (NEWTON, 2008, p. 53-54).

A primeira lei do movimento é o princípio da inércia que, para Jammer (2011), pode ser interpretada com uma definição qualitativa de força. Para Fitas (1996), a primeira lei é o culminar de uma ruptura muito importante com a física pré-galilaica ou aristotélica, onde o movimento era compreendido como um processo, que alterava as características intrínsecas ao corpo e, em contrapartida, o repouso era a ausência desse processo. O primeiro axioma associa a alteração do movimento dos corpos, enquanto estado, ao surgimento de uma força aplicada, ou seja, oferece resistência em alterar seu estado de movimento. Importante notar que, ao contrário da definição III, no primeiro axioma a continuidade de um movimento deixou de exigir a ação contínua

de uma força, desta vez o corpo pode estar em movimento sem estar sob a ação de uma força.

A segunda lei do movimento relaciona a variação do movimento com a força aplicada, em outras palavras, relaciona a força aplicada com a variação temporal da quantidade de movimento. Em linguagem matemática moderna, pode ser expressa de acordo com a relação.

$$F \propto \Delta(mv) \quad (5)$$

Alguns autores discutem que o segundo axioma do movimento possa ser considerado uma definição de força.

Visto que Newton estabelecia uma clara distinção entre definições e axiomas (ou leis do movimento), é obvio que ele não pretendia usar a segunda lei do movimento com uma definição de força (...) Tampouco pretendia usá-la para afirmar um método de mensuração de forças. Para Newton, a força era um conceito dado a priori, intuitivamente; em última análise, era análogo à força muscular humana. A definição IV, portanto, não deve ser interpretada como uma definição nominal, mas como um resultado de uma propriedade característica das forças; a de determinar acelerações (JAMMER, 2011, p.163).

Na terceira lei do movimento, Newton apresenta uma importante característica do conceito de força, seu aspecto dual, chamado hoje de princípio da ação e reação. Vale destacar que a terceira lei do movimento não se trata de uma lei geral da natureza, uma vez que não é válido para qualquer tipo de força, só se aplica às chamadas forças centrais.

As definições, os axiomas e as conclusões de seu modelo matemático estão no Livro I dos *Principia*, nele Newton estruturou seu sistema físico-matemático. Mas, é no Livro III<sup>10</sup> de sua obra, denominado “O Sistema do Mundo”, que o autor se preocupa em aplicar seu modelo matemático ao estudo dos fenômenos naturais. Nesse volume, Newton escreve um conjunto de Proposições, baseando-se nos dados astronômicos e nos resultados do Livro I.

De maneira geral, nas Proposições I, II e III, Newton mostra que as forças que atuam sobre os planetas são forças centrais, sendo dirigidas para o centro e variam

---

<sup>10</sup> Os *Principia* são constituídos de três volumes. O primeiro livro trata do movimento dos corpos, o segundo trata do movimento dos corpos em meios fluidos e o terceiro livro é dedicado ao estudo da gravitação.

com o inverso do quadrado da distância. “Proposição III: Que a força que a lua é mantida em sua órbita tende para a terra e é inversamente proporcional ao quadrado da distância de seu lugar ao centro da terra” (NEWTON, 2008, p.196).

Na Proposição IV, Newton mostra que a força que faz com que os corpos pesados caiam para a Terra é a mesma que faz com que a Lua orbite em torno da Terra. “(...) a força com que a lua é mantida em sua órbita torna-se, na superfície da terra, igual à força de gravidade que observamos nos corpos pesados aqui” (NEWTON, 2008, p.198). Nas Proposições V e VI, a conclusão da Proposição IV é generalizada para os planetas e satélites.

Na Proposição VII, Newton enunciou a Lei da Gravitação Universal: “Que há um poder da gravidade pertencente a todos os corpos, proporcional às várias quantidades de matéria que eles contêm” (NEWTON, 2008, p. 203). Nos comentários da Proposição VII, aparece um enunciado mais parecido com o que costumamos ver nos livros didáticos e que em linguagem matemática moderna seria expresso como na relação 6.

Provamos antes que todos os planetas gravitam em direção uns aos outros, assim como que a força da gravidade em direção a cada um deles, considerado separadamente, é inversamente como o quadrado das distâncias dos lugares aos centro do planeta. (...) segue-se que a gravidade tendendo em direção a todos os planetas é proporcional à matéria que eles contêm (NEWTON, 2008, p.204).

$$F \propto \frac{m.M}{d^2} \quad (6)$$

Desta forma, Newton lançou a base de toda a Mecânica Clássica. Nos *Principia* ele chegou à formulação de uma lei que unificou a descrição dos movimentos no mundo terrestre com a descrição dos movimentos do mundo celeste.

É importante ficar claro que a mecânica clássica não teve seu fim nos trabalhos de Newton, toda sua organização e desenvolvimento de princípios gerais foram feitos durante o século XVIII. As leis de Newton descreviam perfeitamente o movimento de corpos pontuais, mas precisava de ajustes para descrever os movimentos de corpos rígidos e de fluídos. Dos que participaram da continuidade dos estudos da mecânica

clássica, destacamos alguns nomes como: Leonhard Euler (1707 –1783) que considerou a “força” como um conceito fundamental de sua dinâmica, Jean Lê Rond d’Alembert (1717 – 1783), Joseph Louis de Lagrange (1736 – 1813) e William Rowan Hamilton (1805 – 1865) conhecido pelos trabalhos em mecânica analítica.

Obviamente, o desenvolvimento do conceito de força não se estagnou na história, outras formulações ou outras abordagens referente a este conceito foram desenvolvidas. Mas tendo em vista que nos currículos de Física para o Ensino Médio atualmente a conceituação de força é a newtoniana, não abordaremos o desenvolvimento do conceito de força na mecânica pós-newtoniana. Algo que pode ser tratado em trabalhos futuros.

## 2 UMA EXPERIÊNCIA DE ENSINO

Desde o mês de março do ano de 2011 leciono Física, mais precisamente conteúdos de Mecânica, no projeto “Cursinhos da Unesp – FEGVEST”, campus de Guaratinguetá. Após trabalhar com os alunos conteúdos de cinemática, comecei a ensinar a dinâmica dos movimentos, iniciando pelo conceito de força e as leis de Newton<sup>11</sup>.

Além do material didático indicado pelo cursinho, que consiste em um conjunto de apostilas, costumo utilizar dois livros didáticos para o preparo das aulas, a saber: “Física” - volume 1, do autor Alberto Gaspar e “Fundamentos da Física” - volume 1, dos autores Ramalho, Nicolau e Toledo. Além destes materiais, também utilizo, ocasionalmente, outros livros e a internet.

Como se sabe, na maioria das vezes, os conteúdos abordados em um curso pré-vestibular são ensinados de maneira bem rápida, muitas vezes não sendo possível um tratamento mais detalhado de cada assunto. Normalmente, procuro prolongar os conteúdos, de maneira que os temas que estão sendo ensinados não fiquem muito resumidos. Antes das aulas em que os conteúdos de dinâmica foram ensinados, os seguintes conteúdos foram trabalhados: introdução ao estudo dos movimentos, movimento retilíneo uniforme, movimento retilíneo uniformemente variado, cinemática vetorial, lançamentos e movimento circular uniforme.

Na aula em que apresentei o conceito de força e as leis de Newton, discutimos a concepção de força no cotidiano, associada a sua noção mecânica, como por exemplo, a força que fazemos para empurrar ou puxar uma caixa, para levantá-la ou atirá-la. Relacionei o conceito de força como a causa das alterações dos movimentos. Nos livros utilizados, encontramos as seguintes definições de força:

“(...) força é a ação capaz de modificar a velocidade de um corpo” (GASPAR, 2003, p.112).

“Força é a causa que produz num corpo variação de velocidade e, portanto, aceleração” (RAMALHO, FERRARO e SOARES, 2007, p.191).

---

<sup>11</sup> Para redação desse capítulo utilizamos a primeira pessoa do singular por trata-se do relato de uma experiência pessoal que descrevemos com base em nossa memória sobre os eventos.



Após a definição de força e a explicação sobre os tipos de força existentes na natureza, apresentei os enunciados das leis de Newton explicando e exemplificando cada uma delas. Resolvi na lousa diversos exercícios, com as mais diversas aplicações das leis de Newton, relacionando com o que já havíamos estudado até então. No final da aula passei um exercício bastante típico dos vestibulares, cujo enunciado diz:

(Fuvest 96) Um jogador de basquete arremessa uma bola B em direção a cesta. A figura 1, a seguir, representa a trajetória da bola e sua velocidade num certo instante. Desprezando os efeitos do ar, as forças que agem sobre a bola, nesse instante, podem ser representadas por:

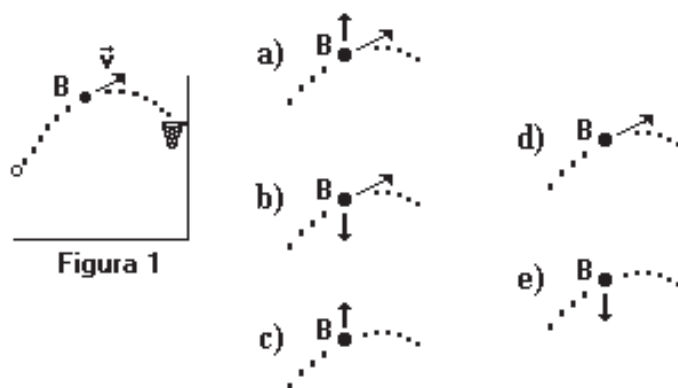


Figura 10: Exercício vestibular FUVEST 1996.  
Extraído de <http://www.fuvest.br/vest1996/provas/P1FB03.STM>

Escrevi a questão e as alternativas na lousa e perguntei pra toda a sala qual alternativa indicava corretamente as forças que estavam atuando sobre o corpo naquele ponto da trajetória. A resposta, dada praticamente em coro pelos alunos, foi que as forças que atuavam sobre o corpo seriam a força peso (vetor na direção vertical e sentido para baixo) e outra força na direção do vetor velocidade (tangente à trajetória parabólica), conforme a alternativa **b** da questão.

Mesmo com o assunto tendo sido discutido, imediatamente antes, em sala de aula, os alunos responderam que teria necessariamente uma força no sentido do movimento, portanto, que duas forças estavam atuando sobre o corpo. Desta forma, os alunos “de forma intuitiva” associaram força com velocidade, ou seja, força agindo no

sentido da velocidade, algo bem semelhante à explicação aristotélica para o movimento de projéteis.

Mesmo sabendo da existência das concepções espontâneas dos alunos, “senti na pele” o quanto elas são intensas. Percebi nos livros que me serviram de apoio para o preparo da aula, que estas ideias não são consideradas de maneira mais cuidadosa. Notei que minha aula, apesar de conter explicação cuidadosa dos conceitos, sobre forças de contato, sobre forças de campo, sobre o caráter vetorial das forças, além de toda a cinemática estudada anteriormente, não foi conduzida de maneira a desconstruir a concepção de força atuando na mesma direção e sentido da velocidade, tão arraigada nos alunos.

Diante deste episódio, fui levado a uma série de questionamentos. Por que parece que os alunos entendem perfeitamente os conteúdos, mas depois, diante de uma pergunta relativamente simples, eles respondem erroneamente? Porque as respostas dos alunos, em um primeiro momento, são sempre baseadas na experiência cotidiana? Por que essas concepções de senso comum são tão resistentes a mudanças? Que tipos de abordagens favoreceriam a desconstrução dessas concepções espontâneas dos alunos?

### 3 REFERENCIAIS TEÓRICOS SOBRE APRENDIZAGEM

Na busca de respostas para essas perguntas, encontrei suporte no Modelo de Mudança Conceitual (MMC), em alguns aspectos da teoria da equilibração de Piaget e na noção de obstáculo epistemológico de Bachelard. A intenção do presente trabalho não foi aprofundar o estudo sobre nenhuma dessas teorias, mas apenas buscar respostas para os questionamentos surgidos durante a reflexão acerca do episódio da aula descrita anteriormente.

#### 3.1 O Modelo de Mudança Conceitual

No processo de ensino em sala de aula, não se pode deixar de lado o fato de que os alunos já possuem conhecimentos que foram construídos em sua história de vida. A construção desses conhecimentos se dá por meio das próprias experiências vividas pelo indivíduo, ou seja, nas interações com tudo e todos a sua volta. Dá-se o nome para este conhecimento, anterior ao conhecimento escolarizado, de concepções alternativas, concepções espontâneas, concepções do senso comum, ideias ingênuas, conceitos intuitivos, entre outros<sup>12</sup>.

As concepções espontâneas possuem um conjunto de características particulares para cada indivíduo, mas muitas dessas concepções são compartilhadas por indivíduos diferentes. Elas possuem uma natureza estruturada, possuem certa coerência do ponto de vista do aluno, mas não do ponto de vista científico e, em alguns casos, são muito parecidas com concepções já registradas na história da ciência.

Devido à importância das concepções alternativas, diversas pesquisas têm sido realizadas (Driver 1973; Malgrange et al., 1973; Sebastia, 1984; Peduzzi, 1992; Müller, 2006; Bueno, 2009) buscando a compreensão das suas implicações no processo de ensino e de aprendizagem. Na área de ensino de ciências, diversas concepções espontâneas já foram mapeadas, principalmente, relacionadas a conteúdos de Física.

---

<sup>12</sup> Essas diferentes nomenclaturas, embora normalmente utilizadas como sinônimos, podem carregar diferenças sutis de significados. Mas, como não é nosso propósito discutir essas diferenças em profundidade, vamos utilizar os termos mais comumente utilizados: concepções alternativas e concepções espontâneas.

Uma das características mais importantes e mais estudadas das concepções espontâneas é sua resistência a mudanças, ou seja, por estarem fortemente arraigadas no pensamento dos alunos elas constituem um obstáculo ao aprendizado dos conceitos científicos. Essa resistência a mudanças, muitas vezes, é apontada como uma das principais causas da dificuldade ao aprendizado, pois os conceitos cientificamente aceitos, são conflitantes com as ideias prévias do aluno (VIENNOT, 1979 apud ARRUDA e VILLANI, 1994). O fato de as ideias prévias apresentarem um certo grau de elaboração e estruturação do ponto de vista cognitivo, faz com que o estudante persista nelas mesmo após o ensino formal, ainda que estando erradas do ponto de vista científico.

A relação entre força e velocidade, analisada sob a perspectiva de diversos trabalhos sobre concepções alternativas, parece ser um bom exemplo de concepção desenvolvida espontaneamente. “Pesquisas têm demonstrado que estas concepções, na forma de expectativas, crenças, princípios intuitivos, e significados atribuídos a palavras, cobrem uma vasta gama de conceitos que fazem parte dos currículos de disciplinas científicas” (ZYLBERSZTAJN, 1983, p.3).

De fato, existe uma lógica, uma coerência com a nossa percepção cotidiana, na associação de força com velocidade. Essa coerência, para os alunos, é expressa pela equivocada afirmação de que *“se um corpo está se movendo em uma dada direção e sentido, então, necessariamente existe uma força nesta mesma direção e sentido atuando sobre o corpo”*.

Essa mesma ideia já foi considerada correta para descrever a causa dos movimentos, conforme mostramos na história do desenvolvimento do conceito de força. Assim, é possível perceber que sua estrutura e o fato dessa ideia ser bem coerente do ponto de vista de nosso cotidiano, colaboram para que seja uma concepção tão resistente a mudança.

Sob essa perspectiva, o grande desafio da educação científica é promover uma mudança conceitual no estudante, ou seja, desenvolver estratégias para que o aluno abandone ou limite o uso das ideias prévias incorretas, para que haja desta forma, a aprendizagem das concepções consideradas corretas cientificamente.

A teoria sobre concepções alternativas que teve mais influência nas pesquisas em educação científica, foi o chamado modelo de mudança conceitual (MMC) e a base epistemológica desse modelo encontra-se nos trabalhos de Kuhn, Lakatos e Toulmin (POSNER et al., 1982 apud MARTINS, 2006).

O Modelo de Mudança Conceitual foi desenvolvido por Posner e colaboradores no fim da década de 1970. O MMC tem como hipótese principal uma analogia entre o processo de aprendizagem e o desenvolvimento da ciência, ou seja, uma relação entre o processo de aquisição do conhecimento e a visão de progresso da ciência.

Segundo os autores, “às vezes os estudantes estão usando os conceitos existentes para tratar com os fenômenos novos” e em outras situações “os conceitos existentes são inadequados para permiti-los compreender com sucesso um novo fenômeno”, o que pode levá-los a “substituir ou reorganizar seus conceitos centrais” (POSNER et al., 1982 apud ARRUDA e VILLANI, 1994). Respectivamente, esses dois padrões de mudança conceitual são chamados no MMC de assimilação e acomodação<sup>13</sup>. Assimilação e acomodação para o MMC correspondem à ciência normal<sup>14</sup> e revolução científica<sup>15</sup>.

O MMC leva em consideração dois elementos principais: as condições para a ocorrência da mudança conceitual; e a ecologia conceitual do aluno, que favorece o contexto na qual a mudança conceitual pode ter espaço.

Posner e seus colaboradores indicam quatro principais condições para que haja a acomodação de um conceito novo, são elas: *insatisfação*, *inteligibilidade*, *plausibilidade* e *fertilidade*. Primeiramente o aluno deve sentir *insatisfação* com as concepções que ele possui previamente, sendo desta forma uma irregularidade com as concepções anteriores. Para que o aluno entenda o novo conceito, esse conceito deve ser *inteligível*, isto é, fazer sentido para o estudante a ponto de que o mesmo consiga explorar suas possibilidades. Sendo este conceito inteligível, ele será *plausível* quando

---

<sup>13</sup> Esses termos, não podem ser confundidos com os termos de assimilação e acomodação da teoria da equilibração de Piaget, embora sejam semelhantes. Os conceitos de assimilação e acomodação piagetianos serão tratados mais adiante.

<sup>14</sup> Ciência normal é um conceito kuhniano que corresponde ao período durante o qual ocorre uma atividade científica baseada num paradigma. Esse período é caracterizado pela aceitação praticamente axiomática de um paradigma qualquer.

<sup>15</sup> Uma revolução científica para Kuhn se dá quando um antigo paradigma é substituído por um novo, dando início a um novo período de ciência normal.

o aluno conseguir, ou pelo menos perceber, a possibilidade de resolver problemas gerados pelos conceitos antes existentes. O novo conceito será também *fértil*, se o aluno considerar que esse conceito traz algo de valioso para ele, ou seja, frutífero e que possua um potencial para ser estendido a outras situações. Para que haja a acomodação, as quatro condições devem ser consideradas em conjunto (ARRUDA e VILLANI, 1994).

A intenção dessas estratégias para que haja a mudança conceitual, é produzir no aluno, mediante a interação com o professor, situações conflitivas para que gere insatisfação no mesmo com relação às suas concepções prévias e que, a partir disso, substitua essas concepções por ideias científicas.

O aspecto central da mudança conceitual reside na modificação simultânea do status das concepções alternativa e científica. Supondo-se que uma concepção alternativa se encontra em conflito com uma concepção científica, é preciso diminuir o status da primeira, sobretudo sua plausibilidade e fertilidade, e, simultaneamente, aumentar o status da segunda (HEWSON e THORLEY 1989 apud EL-HANI e BIZZO, 2002, p. 9).

A expressão ecologia conceitual foi emprestada de Toulmin (1972) e significa o conjunto de ideias que o aluno já possui no instante da aprendizagem. Para Posner e seus colaboradores (1982), são os conceitos que conduzem a mudança conceitual, ou seja, é o conjunto de conhecimentos prévios que propiciam o contexto para que as acomodações e assimilações ocorram. Posner (1982) aponta os seguintes determinantes que, segundo ele, são importantes na direção da acomodação: *anomalias* (o caráter das falhas específicas de uma ideia); *analogias e metáforas* (sugerem novas ideias e as tornam inteligíveis); *compromissos epistemológicos* (ideais explanatórios e pontos de vista gerais sobre o caráter do conhecimento); *crenças e conceitos metafísicos*; e *outros conhecimentos* (de outros campos ou conceitos competitivos) (ARRUDA e VILLANI, 1994).

Tendo em vista os aspectos citados do MMC, percebemos que na aula descrita no capítulo anterior os alunos trouxeram para a sala suas concepções espontâneas (concepções já existentes) e as utilizaram para explicar um fenômeno novo. A resposta de praticamente todos os alunos foi coerente com uma ideia bastante intuitiva a

respeito do movimento de um corpo: há, necessariamente, uma força atuando no sentido do movimento.

Isso nos mostra que houve a assimilação por parte dos alunos, uma vez que eles conseguiram explicar o fenômeno, mesmo que erroneamente, mas a acomodação de fato não ocorreu. Somente os conteúdos apresentados na referida aula não foram suficientes para que ocorresse a acomodação, uma vez que as condições para a ocorrência da acomodação, conforme apontado por Posner, não foram trabalhadas.

Uma aula apenas, com a apresentação dos conceitos científicos e resolução de exercícios pode não ser o suficiente para que os novos conceitos se acomodem de maneira correta na estrutura cognitiva do aluno. Para que o conceito correto fosse acomodado, seria necessário mais tempo para colocar em conflito o modelo intuitivo dos alunos, por exemplo, discutindo casos de forças tangentes às trajetórias. Dessa forma o aprendiz poderia sentir-se insatisfeito com sua concepção anterior sobre força. Seria um ótimo momento para apresentar o conceito científico de maneira inteligível.

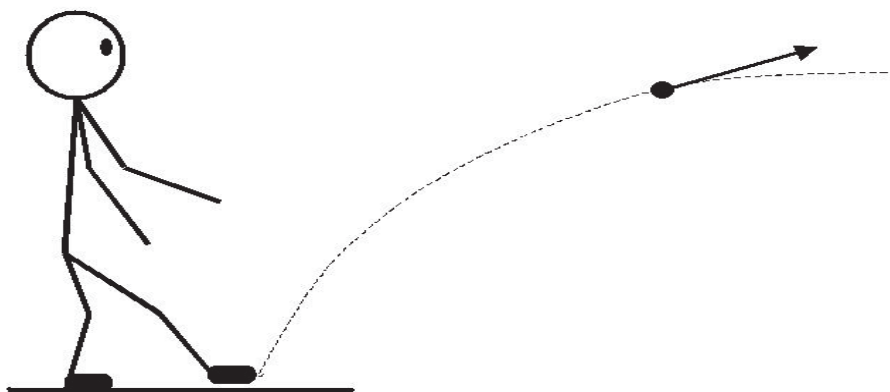


Figura 11: Representação de uma força tangente à trajetória. Haveria algum responsável pela aplicação de força no sentido tangente à trajetória?

Com os exemplos conflitantes o novo conceito se mostraria plausível por conseguir resolver problemas que a concepção anterior não conseguisse resolver. Por fim, seria interessante mostrar diversos exemplos em que este novo conceito se aplica de maneira satisfatória.

A princípio encontramos suporte no MMC para respondermos ao primeiro dos questionamentos: por que os alunos aparentemente entenderam o que foi explicado na aula, mas mesmo assim usaram ideias alternativas na explicação dos fenômenos? Parece que houve a assimilação do novo conceito, por meio das explicações apresentadas na aula. Mas não foi suficiente para que houvesse a acomodação, ou seja, não houve tempo, ou situações conflitantes suficientes para que o aluno sentisse insatisfação com a concepção prévia que possuía.

### **3.2 Alguns aspectos da teoria da equilibração de Piaget**

Dentre os diversos aspectos da teoria de Jean Piaget (1896 – 1980), destacamos os conceitos de assimilação e acomodação. Na seção anterior esses conceitos foram abordados na perspectiva do MMC, agora vamos discuti-los do ponto de vista piagetiano.

Para Piaget (1980), o desenvolvimento cognitivo se dá por meio da interação entre o sujeito e o objeto de conhecimento. Para ele a relação cognitiva entre objeto e indivíduo é uma relação dialética, pois se trata de processos de assimilação que decorrem por aproximações sucessivas e por meio dos quais o objeto apresenta novos aspectos, características e propriedades, para o sujeito. A essa relação dialética dá-se o nome de equilibração, que ocorre por meio dos processos de assimilação e acomodação (PIAGET, 1980 apud PÁDUA, 2009).

A assimilação é o processo cognitivo pelo qual uma pessoa integra (internaliza) um novo evento às estruturas cognitivas existentes previamente. Em outras palavras, é a incorporação de elementos do meio externo (objeto, conceito físico, acontecimento, etc.) a um esquema ou estrutura conceitual do indivíduo.

Na assimilação o sujeito usa as estruturas que já possui, ou seja, quando um sujeito vive uma nova experiência, ele tenta continuamente adaptar esses novos estímulos às estruturas cognitivas já existentes. Por exemplo, quando se diz que uma grandeza física é vetorial, incorpora-se esta grandeza ao esquema “vetor”. Outro exemplo: quando se mede uma distância, usa-se a estrutura de “medir” para assimilar a situação.



Nota-se que nos dois exemplos o organismo não se modifica, isto é, no processo de assimilação a mente não se modifica, o conhecimento prévio não é alterado. Os esquemas de “vetor” e de “medir” não são modificados (MOREIRA, 1999).

A acomodação é o processo que ocorre quando o indivíduo não consegue assimilar um novo estímulo, ou seja, não existe uma estrutura cognitiva que assimile a nova informação. Diante disso, o sujeito cria uma nova estrutura cognitiva ou modifica uma já existente, ocorrendo, dessa forma a acomodação. Quando a estrutura se transforma para dar conta dessas estranhezas do meio (problemas e dificuldades) ela realiza uma diferenciação, ou seja, ela se transforma em função do que foi assimilado.

Para Piaget, é por meio das acomodações que se dá o desenvolvimento cognitivo, que leva a construção de novos esquemas de assimilação. Se o meio não apresenta dificuldades e problemas à atividade das estruturas cognitivas, ocorre apenas a assimilação, mas se houver problemas e dificuldades, a mente se estrutura (se acomoda) e se desenvolve.

O equilíbrio entre assimilação e acomodação é a *adaptação* à situação. Experiências acomodadas dão origem, posteriormente, a novos esquemas de assimilação e um novo estado de equilíbrio é atingido. Novas experiências, não assimiláveis, levarão a novas acomodações e a novos equilíbrios (adaptações) cognitivos (MOREIRA, 1999, p.100).

Desta forma, equilibração é o processo da passagem contínua de um estado de menor equilíbrio a um estado de equilíbrio superior, e se dá em virtude de um desequilíbrio, que ocorre quando se espera que uma determinada situação ocorra de uma forma, mas essa não ocorre.

Olhando para a aula citada, agora sob o ponto de vista dos conceitos de assimilação e acomodação da teoria piagetiana, vemos que os alunos assimilaram o conceito de força, incorporando-o ao conceito bem conhecido de velocidade. Interessante notar que a associação do conceito de força ao conceito de velocidade não modificou o esquema dos alunos com relação à velocidade. Para eles, o vetor velocidade é dirigido na direção tangente à trajetória, isso não mudou, o que ocorreu foi a adaptação do conceito de velocidade para incorporar o conceito de força nessa característica do vetor.

A associação que os alunos fizeram entre força e velocidade é muito coerente com a percepção cotidiana. Não foi uma situação conflitante, ou problemática. Dessa forma, a associação entre força e velocidade não foi capaz de fazer com que os alunos modificassem a estrutura pré-existente, ou seja, que ocorresse a diferenciação.

Mais uma vez, vemos que situações conflitantes deveriam ter sido apresentadas aos alunos. Para que, desta forma, fosse gerado o conflito cognitivo e novas estruturas fossem criadas, ou para que as estruturas já existentes fossem modificadas (acomodação).

O conceito de obstáculo epistemológico, de Gaston Bachelard, pode nos ajudar a entender porque as concepções pré-existentes nos estudantes, ideias do senso comum, são tão resistentes a mudanças.

### **3.3 Obstáculo epistemológico de Gaston Bachelard**

Os obstáculos epistemológicos foram assim chamados pelo filósofo Gaston Bachelard (1884 – 1962) em sua obra denominada “A formação do Espírito Científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento”. Nessa obra, o autor propõe-se a descrever a formação do espírito científico que, para ele, se inicia com a percepção ingênua de um fenômeno, um espírito pré-científico, e necessita superar uma série de obstáculos epistemológicos para atingir um estágio científico. Para Bachelard (1996), o progresso do pensamento científico se dá graças às transposições de tais obstáculos, intimamente ligados ao processo de conhecimento. Segundo Bachelard:

*(...) é em termos de obstáculos que o problema do conhecimento científico deve ser colocado. E não se trata de considerar obstáculos externos, como a complexidade e a fugacidade dos fenômenos, nem de incriminar a fragilidade dos sentidos e do espírito humano: é no âmago do próprio ato de conhecer que aparecem, por uma espécie de imperativo funcional, lentsidões e conflitos (BACHELARD, 1996, p. 17).*

Na perspectiva bachelardiana, o progresso da ciência se dá por meio de revoluções e não de evoluções. A ciência se desenvolve através de rupturas, sendo a fonte dessas rupturas o fato de que o sujeito do conhecimento coloca algo de si, elabora algo novo, sempre com o já conhecido, no ato de conhecer. Nas palavras do próprio Bachelard (1996 p.17): “(...) o ato de conhecer dá-se contra um conhecimento

anterior, destruindo conhecimentos mal estabelecidos, superando o que, no próprio espírito, é obstáculo à espiritualização”. Sendo assim, os obstáculos epistemológicos são inerentes ao processo de conhecimento, constituem-se em apropriações ao que já se conhece, podendo ser entendidos como anti-rupturas. Sendo, desta forma, o conhecimento comum um obstáculo ao conhecimento científico, pois o conhecimento científico se trata de um conhecimento abstrato. Para este autor, as dificuldades de abstração partindo dos fenômenos concretos entrevam o pensamento científico.

Bachelard (1996) classifica as principais categorias de obstáculo epistemológico ao progresso da ciência, sempre fazendo um paralelo com situações pedagógicas, onde essas categorias de obstáculos representam uma barreira à assimilação do conhecimento. Podemos destacar alguns: (i) A experiência primeira; (ii) A generalização; (iii) Obstáculo verbal; (iv) Substancialização e (v) Obstáculo animista.

(i) A experiência primeira: é a experiência que é colocada antes e acima de qualquer crítica, gerando interesse pela beleza do experimento e não pela explicação do ponto de vista científico.

É possível minimizar e até mesmo retificar essa experiência primeira por meio de uma ação que o autor chamou de “trazer a bancada do laboratório para o quadro-negro”, ou seja, procurar impedir que aconteçam apenas satisfações e admirações por imagens, preocupando-se com os fundamentos explicativos dos fenômenos presentes nas atividades experimentais. Segundo Bachelard, uma ciência que aceita imagens é vítima de metáforas e experiências repletas delas são, na realidade, sem grande valor se não for extraído o abstrato do concreto, isto é, o experimento deve ser utilizado como uma ferramenta auxiliar ilustrativa e não se resumir a uma sucessão de resultados visualmente interessantes (GOMES e OLIVEIRA, 2007, p. 97-96).

(ii) A generalização dá-se por meio da ausência da busca pela explicação do fenômeno, normalmente, no instante seguinte às primeiras observações. Por meio das generalizações se estabelecem as leis e com o uso delas as explicações parecem ficar claras, completas e fechadas. Dificilmente estimula-se o interesse por questionar as premissas, ou seja, perde-se o interesse pelo estudo aprofundado do fenômeno e cria-se um obstáculo em sala de aula para elevação do espírito científico (GOMES e OLIVEIRA, 2007).

(iii) Obstáculo verbal: é uma falsa explicação obtida a custo de uma palavra explicativa. São utilizadas nas aulas de ciências, quando fenômenos são explicados por meio de imagens, expressões, analogias ou metáforas. A analogia, funcionando como uma imagem, corre o risco de fazer o papel da explicação. Bachelard não é totalmente contra o uso de analogias, desde que elas venham posteriormente à teoria auxiliando no esclarecimento do fenômeno.

(iv) Substancialização: é a explicação monótona das propriedades pela substância. É originário do materialismo promovido pela atribuição de qualidades aos fenômenos e que, segundo Bachelard (1996), é um dos mais difíceis obstáculos a superar, pois é apoiado numa filosofia fácil.

(v) Obstáculo animista: chamado por Bachelard de “obstáculo animista nas ciências físicas”, é a tendência para, de maneira ingênua, atribuir vida, animar a objetos inanimados. Vida é uma palavra mágica, é uma palavra valorizada para Bachelard (1996), ela marca um valor às substâncias. Em educação científica, esse obstáculo constitui grande dificuldade à apropriação dos conceitos científicos, pois a compreensão das representações da ciência exige uma ruptura com as representações animistas. “Com a ideia de substância e com a ideia de vida, ambas entendidas de modo ingênuo, introduzem-se nas ciências físicas inúmeras valorizações que prejudicam os verdadeiros valores do pensamento científico” (BACHELARD, 1996, p. 27).

A noção de obstáculo epistemológico pode ser estudada tanto no desenvolvimento histórico do pensamento científico como também na prática da educação, pois, “se um conceito serviu historicamente para superar um obstáculo epistemológico, pode servir também para superar os obstáculos epistemológicos dos alunos atuais” (GAGLIARD e GIORDAN, 1986 apud TEODORO, 2000, p. 57).

(...) o adolescente entra na aula de física com conhecimentos empíricos já construídos: não se trata, portanto, de adquirir uma cultura experimental, mas sim de mudar de cultura experimental, de derrubar os obstáculos já sedimentados pela vida cotidiana (BACHELARD, 1996, p. 23).

Acreditamos que a identificação das concepções prévias que os alunos trazem para sala de aula, em alternativa as concepções científicas, podem ser um obstáculo epistemológico impedindo o aluno de progredir. Os professores, portanto, devem levar em consideração os conhecimentos que os estudantes já possuem, pois esses conhecimentos não científicos, bastante arraigados nos alunos, oferecem uma satisfação imediata à curiosidade do aprendiz. E, para Bachelard (1996), os educadores devem se preocupar em alterar esses conhecimentos prévios dos alunos, pois não é possível, incorporar novos conhecimentos a essas concepções primordiais já enraizadas.

Pensando no episódio da aula, vemos que as concepções dos alunos com relação à concepção de força e movimento são muito resistentes a mudanças. Suas experiências primeiras, provavelmente, mostraram que para colocar um corpo em movimento numa dada direção e sentido, necessariamente, deveria aplicar uma força naquela direção e sentido. Essa experiência cotidiana os satisfaz e torna-se um obstáculo para aprendizagem.

Em um primeiro momento, dizer que para um corpo estar em movimento não necessariamente precisa haver forças atuando sobre ele, pode exigir um nível de abstração ainda inatingível para o aluno. A grande dificuldade dos alunos de pensarem de forma abstrata revela a necessidade de superação de obstáculos para elevação do espírito científico, no sentido bachelardiano.

Na obra citada, Bachelard recorre a inúmeros episódios da história das ciências, da Física, da Química e da Biologia, para exemplificar os obstáculos à aprendizagem. Da mesma forma, encontramos na história do desenvolvimento do conceito de força, o exemplo do conceito errôneo apresentado pelos alunos, sem dúvida, um obstáculo para que aprendessem o que estava sendo ensinado.

#### **4 HISTÓRIA E FILOSOFIA DA CIÊNCIA (HFC) NO ENSINO DE CIÊNCIAS**

Abordagens envolvendo história da ciência em diversos níveis de ensino já foram investigadas por pesquisadores e educadores (Peduzzi, 1996; Martins, 2000; Dias, 2006, Bueno, 2009). É notório que uma abordagem histórica da ciência no ensino de Física possui uma potencialidade para que o aluno possa contextualizar os conceitos físicos estudados em sala de aula, fazendo desta forma, uma retomada histórica de como esses conceitos foram se construindo ao longo do tempo.

Matthews (1995) aponta alguns motivos pelos quais a utilização da HFC contribui para o ensino: motiva e atrai o aprendiz; humaniza a matéria; leva o aprendiz a uma melhor compreensão dos conceitos científicos pelo fato de traçar seu desenvolvimento e aperfeiçoamento ao longo do tempo; há um valor essencial em se compreender certos episódios fundamentais na história da ciência; mostra a mutabilidade e a instabilidade da ciência e, como consequência, mostra que o pensamento científico está sujeito a constantes transformações; permite uma compreensão mais conveniente do método científico; entre outros.

Um reflexo disso é o levantamento da importância da história da ciência como complemento nas abordagens de ensino de ciências, contida nos últimos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN). Apesar do crescimento do espaço nas pesquisas sobre inserção da história da ciência no ensino, ainda existem algumas dificuldades na aplicação efetiva de tal abordagem. Martins (2006) aponta algumas das principais barreiras como: a falta de professores com formação apropriada para pesquisar e ensinar corretamente história da ciência, a falta de materiais didáticos apropriados e equívocos com relação à natureza da ciência.

A realidade que se vê hoje é que os professores, por não possuírem formação específica em história da ciência (ou por terem uma formação insipiente quanto à história da ciência que lecionam), muitas vezes acabam não ensinando a história da ciência da maneira correta, se sentem inseguros e desamparados, ou seja, o ensino pode perder em qualidade.

No que diz respeito aos materiais didáticos, vemos que muitas vezes trazem conceitos, leis e princípios que enfatizam o produto final da ciência, em detrimento do processo de construção do conhecimento científico. Normalmente, quando aspectos históricos da ciência são abordados nos livros didáticos, são de forma separada do conteúdo (normalmente, em forma de pequenas biografias dos cientistas), de forma descontextualizada e trazendo sempre a ideia de que os cientistas eram grandes gênios, destacando desta forma, uma versão heróica da ciência. Existe uma mobilização recente para produção de materiais didáticos que contenham uma abordagem histórica mais condizente com a natureza da ciência e do trabalho dos cientistas (MARTINS, 2006; DIAS, 2006).

Diante disso, alguns questionamentos são feitos com relação à abordagem histórica de conceitos científicos. Como enfrentar essas barreiras com relação ao uso de HFC em sala de aula? Como abordar os conteúdos de maneira que os estudantes compreendam os conceitos envolvidos, utilizando aspectos históricos?

Para Piaget e Garcia (1987) a evolução das ideias nos alunos se dá de maneira semelhante às apresentadas por filósofos ou cientistas. E por conta disso, algumas analogias podem ser traçadas entre o desenvolvimento de conceitos em determinados períodos da história e os apresentados pelos alunos.

Para tanto, além dos professores serem criteriosos com relação à escolha dos conteúdos históricos a abordar, devem também possuir um profundo embasamento teórico do assunto. É de grande importância que os objetivos sejam previamente definidos pelo educador e que fundamentalmente a atividade auxilie o estudante a construir uma visão realista sobre a ciência.

Segundo Bueno (2009) o uso de HFC possibilita que o aluno construa seu conhecimento científico. Através de uma sequência de ensino composta por algumas etapas, Bueno (2009) primeiramente utiliza experimentos simples para colocar o aluno diante de um problema que faça parte de sua vivência. Por fim é apresentado aos alunos trechos de textos originais, que colocam os alunos diante das diferentes formas de pensar ao longo da história.

Uma boa estratégia de uso de HFC no ensino pode permitir que o aluno enxergue como conceitos/ideias diferentes dos aceitos hoje, foram articulados e defendidos de maneira coerente por grandes cientistas da história e, como consequência, como foram difíceis de serem superados.

Acreditamos, desta forma, que a inserção da HFC no ensino de ciências resultaria numa estratégia valiosa para o professor, inclusive, no que se refere ao estudo do conceito de força.

## **5 REINTERPRETANDO O EPISÓDIO DA AULA**

Após a explanação acerca dos conceitos de assimilação e acomodação, tanto do ponto de vista do MMC como da teoria da equilíbrio de Piaget, bem como da noção de obstáculo epistemológico e da breve discussão sobre o uso da HFC no EC, procuramos sintetizar nossa reflexão sobre o episódio da aula.

Dos inúmeros conceitos científicos envolvidos no ensino de Física, parece que os conceitos relacionados ao estudo da mecânica são os que mais possuem semelhanças, entre a concepção prévia dos alunos e a chamada velha Física.

Muitas das ideias da velha Física (aristotélica, por exemplo) foram elaboradas com base em experiências pessoais, observações do cotidiano, assim como muitas ideias prévias formadas pelos alunos sobre conceitos científicos, erradas do ponto de vista científico atual, são elaboradas a partir de suas vivências.

A compatibilidade com a experiência cotidiana ajuda a entender porque a visão de mundo aristotélica foi bastante influente durante quase vinte séculos. Também nos ajuda a perceber que as concepções prévias podem ser um imenso obstáculo para os estudantes aprenderem conhecimentos científicos na escola.

A persistência das noções alternativas do conceito de força, mesmo após anos de ensino formal, é um indicativo de que há uma descontinuidade, uma espécie de “abismo” entre o que aluno já sabe (o senso comum) sobre força e aquilo que o professor ensina em sala de aula, suas estruturas científicas sobre força. Esta descontinuidade por sua vez, promove um obstáculo tanto ontológico, como epistemológico, para que o aluno evolua, de forma suave e contínua, para categorias



de poder explanatório sucessivamente mais abrangentes da noção de força (WATTS e ZYLBERSTAIN, 1981 apud RADÉ, 2005, p. 119).

Por isso, a possibilidade de associação das concepções prévias dos alunos, sobre força e velocidade, com as concepções propostas pelos aristotélicos, com as teorias de força impressa, com a ideia de *impetus*, entre outras, parece ser um caminho promissor para o ensino.

Considerando que o processo de construção do conceito na estrutura cognitiva do aprendiz se assemelha bastante ao processo de construção e evolução de um conceito ao longo da história, os obstáculos que um conceito científico precisa superar para se firmar, podem ser os mesmos obstáculos para a prática do ensino e para a aprendizagem destes conceitos. Portanto,

(...) faz-se necessário despertar a consciência por parte do aprendiz, da semelhança de seu pensamento espontâneo com os já referidos modelos históricos, objetivando através disso, a valorização de sua auto-estima, a superação das noções de que a Ciência é imutável e dona da verdade absoluta e, de que o professor é o detentor e transmissor de todo o conhecimento, “que por sua vez se encontra muito bem armazenado nos livros didáticos” (CAMARGO, 2000, p.25).

Vamos, então, explorar possíveis associações entre as concepções reveladas pelos alunos e algumas daquelas que apresentamos no capítulo 1.

No episódio da aula relatada, vimos que os alunos explicitaram a concepção que: o corpo se move devido à ação de uma força e quando esta força deixar de existir o movimento cessa. Essa ideia é bastante semelhante ao conceito de movimento forçado de Aristóteles: um movimento não natural só existe se uma força atuar sobre o corpo. Parece que os alunos, espontaneamente, elaboraram a ideia de *cessant causat cessant effectus* (cessada a causa cessado o efeito).

A afirmação dos alunos de que havia uma força atuando tangente à trajetória, ou seja, no sentido da velocidade, nos remete à outra concepção aristotélica. Para Aristóteles, a força era diretamente proporcional à velocidade. Quanto maior a força, maior a velocidade do corpo, mantido o meio onde se encontrava o corpo, como expressamos pela relação:  $v \propto F/R$ .

Essas similaridades entre as concepções espontâneas dos estudantes e a física aristotélica parecem não se aplicar ao conceito de *antiperistasis*. Os alunos não chegaram a relacionar a causa do movimento de um projétil com a ação do ar, o que é bastante razoável do ponto de vista lógico, pois essa explicação foi um artifício aristotélico para argumentar sobre a inexistência do vácuo.

Quando questionados sobre a origem da força que diziam atuar sobre a bola, na mesma direção e sentido da velocidade, os alunos responderam que era a “força com que a bola foi lançada”. Seria uma ideia análoga à ideia medieval de força impressa, como aquela defendida por Hiparco, Filoponos e Buridan sobre o *impetus*? Parece que sim, visto que as teorias de força impressa eram baseadas em duas afirmações essenciais sobre movimento: ao se colocar o objeto em movimento, transmite-se ao objeto uma força interna que serve para manter o movimento; e essa força interna (chamada por Buridan de *impetus*) se extingue gradualmente até que o objeto pare.

A história nos mostra que essas ideias pareciam plausíveis e deram conta de explicar muitas coisas, sendo assim sustentadas até que superadas cientificamente por ideias mais adequadas ou com maior poder explicativo.

Podemos, então, supor que com as ideias espontâneas manifestadas sobre o conceito de força, os alunos são capazes de lidar com grande parte das situações encontradas no cotidiano. A desconstrução dessas ideias para acomodação do modelo newtoniano é dificultada, portanto, pela ausência de contradição ou incoerência, ou seja, a simples apresentação do conceito de força newtoniano não é capaz de gerar conflitos.

As ideias intuitivas do aluno não causaram insatisfação (uma das condições para a ocorrência da mudança conceitual) diante do problema que lhes foi proposto, ou diante do estudo das leis de Newton. Parece claro que outras estratégias deveriam ser exploradas para causar o desconforto em relação aos conhecimentos prévios.

Diante de tudo o que foi exposto, nos parece que apresentar aos alunos um pouco da história do desenvolvimento do conceito de força, seria um bom caminho para conseguir uma mudança conceitual.

Na busca da mudança conceitual diversas atividades podem ser desenvolvidas de modo que se possam atingir os quatro aspectos apontados por Posner (1982), insatisfação, inteligibilidade, plausibilidade e fertilidade. Citando um exemplo de atividade, podemos propor uma atividade em que a abordagem dos conceitos seja feita na forma de debates.

A atividade didática trata da evolução histórica do conceito de força, assim como de outros conceitos correlatos que fazem parte da construção do que hoje entendemos como força. O estudo pode ser feito desde a concepção de força na antiguidade, o desenvolvimento do conceito de força na ciência grega, a ideia de força na mecânica pré-clássica e na mecânica clássica, até as concepções mais modernas de interações na física, ou seja, uma visão de força na ciência contemporânea. Mas, se tratando de conteúdos relacionados ao Ensino Médio o enfoque principal da atividade seria tratar de maneira mais específica às concepções aristotélicas, passando pela visão de força da Idade Média (teoria do *impetus*), os princípios das concepções inerciais até chegar na mecânica newtoniana do séc. XVII.

A ideia seria usar a abordagem de debates com os alunos em sala de aula. As discussões seriam feitas para fomentar as ideias acerca da evolução dos conceitos. Grupos de alunos poderiam ser formados, de forma que cada grupo ficaria responsável por explicar o fenômeno do lançamento do projétil de uma forma. Cada qual responsável por explicar o acontecimento segundo uma teoria, sendo elas: *antiperistasis* aristotélica, teoria do *impetus* e a explicação de acordo com mecânica newtoniana. Desta forma, os alunos terão que articular suas ideias de modo que consigam explicar o fenômeno da maneira correta.

Com o intermédio do professor, problemas serão colocados à prova, e as incoerências de algumas teorias aparecerão. Desta forma os alunos se sentirão insatisfeitos com aquela concepção prévia dele, que coincide com a concepção antiga. A partir disso, o professor tem o espaço e a oportunidade de mostrar aos alunos a plausibilidade e a fertilidade das concepções newtonianas acerca do movimento, uma vez que elas já eram inteligíveis aos estudantes.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados a respeito do desenvolvimento histórico do conceito de força possibilitaram uma compreensão maior de como ocorre a construção do conhecimento científico. Um conceito em específico não evolui sozinho, existe um contexto histórico, social e cultural que influencia no desenvolvimento do mesmo. E esse desenvolvimento não se faz “da noite para o dia”, e nem mesmo por um ou outro personagem. O conhecimento se constrói de maneira não linear, repleto de equívocos e com contribuições de personagens que comumente sequer são citados nos livros.

O conceito de força, em particular, foi tratado com diferentes interpretações em sua história milenar. Atualmente podemos dizer que possui uma definição consolidada na ciência e representa um papel importante nos currículos de Física do ensino médio.

O estudo da história desse conceito permitiu traçar paralelos entre o seu desenvolvimento ao longo da história e sua ancoragem nas estruturas cognitivas dos estudantes. Assim como o conceito de força em sua história teve que ultrapassar inúmeros obstáculos até encontrar a elaboração hoje considerada cientificamente correta, a dimensão do quanto são enraizadas as concepções prévias dos alunos ficou evidente no acontecimento da aula no cursinho.

A presença e resistência destas concepções ficaram mais compreensíveis após debruçarmos em alguns referenciais sobre aprendizagem. Os conceitos do MMC esclareceram as condições necessárias para que o aluno desconstrua uma ideia anterior e construa uma ideia correta do ponto de vista da ciência. Por meio desse modelo foi possível concluir que a abordagem utilizada na aula analisada não favoreceu essa mudança conceitual nos alunos.

Num primeiro momento acreditamos que os alunos entenderam os conceitos apresentados na aula, ou seja, assimilaram o que foi dito, mas não foi o suficiente para que eles acomodassem o novo conceito, conforme percebemos a partir da teoria piagetiana. Com o primeiro exercício proposto, na primeira situação-problema apresentada, a ideia prévia veio à tona, mostrando ser mais forte que os novos conceitos estudados.

Por meio da noção de obstáculo epistemológico de Bachelard, foi possível entender o elo entre a aprendizagem de novos conceitos e a força dos conceitos antigos. Bachelard nos revelou, por meio de vários episódios históricos, como as concepções espontâneas dos alunos podem ser tão resistentes a transformações, muitas vezes não bastando apenas a explicação, construção de exemplos de aplicação ou experimentos, para sua desconstrução. O desenvolvimento do conhecimento se dá pela transposição de obstáculos, processo essencial revelado pela história da ciência.

Considerando que a finalidade de um ensino de Física de qualidade é fazer com que os alunos aprendam de maneira significativa, saibam pensar cientificamente, mudando suas concepções ou ao menos as aproximando das concepções científicas, o que o aluno traz consigo não pode simplesmente ser deixado de lado. O uso da história pode auxiliar o professor na tarefa de fazer com que os alunos percebam que suas ideias estão incompletas ou inadequadas de acordo com a Física aceita atualmente, e convencê-los da mudança conceitual que deve ser feita.

Nesse sentido, julgamos que a história do desenvolvimento do conceito de força pode contribuir para o ensino desse conceito no nível médio, de maneira a desconstruir ideias espontâneas, bastante arraigadas, presentes nos estudantes.

Realizados estes estudos sobre o desenvolvimento do conceito de força, sobre aplicações de HFC no ensino, sobre o MMC, sobre a teoria da equilibração, e sobre obstáculos epistemológicos, consideramos que nossa postura frente a uma situação análoga à da aula discutida será diferente futuramente. Com a visão geral do que pode estar acontecendo com os alunos com relação à aprendizagem de certos conceitos, outras abordagens serão utilizadas, sempre na tentativa de promover a mudança conceitual, do que é intuitivo para o que é cientificamente correto.

O desenvolvimento deste trabalho trouxe contribuições significativas para nossa formação docente. Por meio dele conseguimos aprofundar os estudos em história da ciência, mais especificamente sobre o conceito de força, estudar mais algumas teorias de aprendizagem e relacionar essas teorias aprendidas durante o curso com a prática docente.

Estamos convencidos que para ensinar o conceito newtoniano de força, bem como toda a mecânica, o uso da história da ciência pode ser eficaz e esperamos que esse trabalho possa ter apresentado boas razões para sua utilização em sala de aula. Esperamos também que possa ser uma fonte de dados para professores de Física usarem a história do desenvolvimento do conceito de força em uma aula sobre a mecânica newtoniana.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARRUDA, S. M. e VILLANI, A. Mudança conceitual no Ensino de Ciências. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**. v.11, n. 2: p.88-99, ago.1994.

BACHELARD, G. **A formação do espírito científico: contribuição para uma psicanálise do conhecimento**. Trad. Estela dos Santos Abreu. Rio de Janeiro: Contraponto, 1996.

BUENO, M. C. F. **Os textos originais para ensinar conceitos de mecânica**. Dissertação de Mestrado. São Paulo. Instituto de Física da USP, 2009.

CAMARGO, E. P. **Um estudo das Concepções Alternativas sobre Repouso e Movimento de Pessoas Cegas**. Dissertação de Mestrado. Bauru. Faculdade de Ciências-UNESP, 2000.

CRUZ, F. F. de S. O conceito de força no pensamento grego. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 2, n.1, p. 16 – 24, abril.1985.

DIAS, Penha Maria Cardoso.  $F=ma$ ?! O nascimento da lei dinâmica. **Rev. Bras. Ensino Física**. São Paulo, v. 28, n. 2, June/2006.  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S180611172006000200013&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S180611172006000200013&lng=en&nrm=iso). Acesso em 13/05/2011.

DIAS, V. S. A Indução Eletromagnética na Sala de Aula. In: SILVA, C. C. (Org.). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, p. 207-220, 2006.

DRIVER, R. **The representation of conceptual frameworks in Young adolescent science students**. Doctoral dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1973.

EL-HANI, C. N. e BIZZO, N. M. V. Formas de Construtivismo: Mudança Conceitual e Construtivismo Contextual. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, v. 4, n.1, 2002.

ÉVORA, F. R. R. Natureza e Movimento: um estudo da física e da cosmologia aristotélicas. **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, Campinas, Série 3, v. 15, n. 1, p. 127-170, jan.-jun. 2005.

FITAS, A. J. S. Os Principia de Newton, alguns comentários - Primeira parte, a Axiomática. **Vértice**, v. 72, p. 61-68, 1996.

FUVEST. Fundação Universitária para o Vestibular. São Paulo. Disponível em: <<http://www.fuvest.br/vest1996/provas/P1FB03.STM>>. Acesso em: 17 out. 2011.

GASPAR, A. **Física – volume 1. Mecânica**. São Paulo: Ática, 2003

GOMES, H. J. P.; OLIVEIRA, O. B. Obstáculos epistemológicos no ensino de ciências: um estudo sobre as influências nas concepções do átomo. **Ciência & Cognição**, v. 12, p. 96 – 109, 2007.

GONZATTI, S. E. M.; SARAIVA, M. F. O.; RICCI, T. F. **Um curso introdutório à astronomia para a formação inicial de professores de ensino fundamental, em nível médio**. Textos de apoio ao professor de Física, v.19, n. 3, 2008.

HEISENBERG, W. **A imagem da natureza na física moderna**. Lisboa: Edição Livros do Brasil, 1981.

INEP. Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Disponível em: <http://portal.inep.gov.br/provas-e-gabaritos> Acesso em: 01dez. 2011.

JAMMER, M. **Conceitos de força: estudos sobre o fundamento da dinâmica**. Rio de Janeiro: Contraponto/PUC-RIO, 2011.

KOYRÉ, A. **Estudos Galilaicos**. Lisboa: Dom Quixote/Coleção Opus – Biblioteca de Filosofia, 1986.

MALGRANGE, J. L.; SALTIEL, E.; VIENNOT, L. **Vecteurs, scalaire et grandeurs physiques**. Bulletin de la Société Française de Physique – Encart Pedagogiques, v.1, p. 3-13, 1973.

MARTINS, R. A. Introdução: A história das ciências e seus usos em educação. In: SILVA, C. C. (Org.). **Estudos de história e filosofia das ciências: subsídios para aplicação no ensino**. São Paulo: Editora Livraria da Física, p. xxi-xxxiv, 2006.

MARTINS, R. A. Arquimedes e a coroa do rei: problemas históricos. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 17, n. 2, p. 115-121, 2000.

MATTHEWS, M. R. História, Filosofia e Ensino de Ciências: a tendência atual de reaproximação. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 12, n. 3, p.164 – 214, dez. 1995.

MOREIRA, M. A. Teorias de aprendizagem. **São Paulo: EPU, 1999**.

MÜLLER, M. A. T. **Concepções espontâneas da relação força e movimento e suas implicações na interpretação do estado supercondutor**. Dissertação de Mestrado. Vitória. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.



NEVES, M. C. D. Uma Investigação Sobre a Natureza do Movimento ou Sobre uma História para a Noção do Conceito de Força. **Revista Brasileira do Ensino de Física**, v. 22, n. 4, p. 543-556, 2000.

NEWTON, I. **Principia: Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livros I, II, III.** (2ed) São Paulo: Editora da USP, 2008.

PÁDUA, G. L. D. A Epistemologia Genética de Jean Piaget. **Revista FACEVV**. n. 2, p. 22-35, 2009.

PEDUZZI, L. O. Q. **Força e movimento: de Thales a Galileu.** 165p. 2008. (Desenvolvimento de material didático ou instrucional - Texto de física, em nível universitário básico) Departamento de Física – Publicação Interna – Universidade Federal de Santa Catarina.

PEDUZZI, L. O. Q. Física aristotélica: por que não considerá-la no ensino da mecânica? **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v. 18, n. 3, p. 48-63, 1996.

PEDUZZI, L. O. Q. Força e Movimento na Ciência Curricular. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 14, n. 2, 1992.

PIAGET, J. e GARCIA, R. **Psicogênese e História das Ciências.** Ciência Nova. Lisboa: Dom Quixote, v. 6, 1987.

PIRES, A. S. T. **Evolução das idéias da Física.** São Paulo: Editora Livraria da Física, 2008.

PORTO, C. M.; PORTO, M. B. D. S. M. Galileu, descartes e a elaboração do princípio da inércia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 31, n. 4, Dez. 2009.

POSNER, W. A.; STRIKE, K. A.; HEWSON, P. W.; GERTZOG, W. A. Accomodation of a Scientific Conception: Toward a Theory of Conceptual Change. **Science Education**, v. 66, n. 2, p.211-227, 1982.

RADÉ, T. S. **O Conceito de força na Física – Evolução histórica e perfil conceitual.** Dissertação de Mestrado. Canoas: Universidade Luterana do Brasil, 2005.

RAMALHO. JR. F., FERRARO. N. G., SOARES. P. A. T. **Os Fundamentos da Física.** v.1. Mecânica. São Paulo: Moderna, 2007.

SEBASTIA, J. M. Fuerza y movimiento: la interpretación de los estudiantes. In: **Enseñanza de las ciencias**, v. 2, n. 3, p. 161 – 169, 1984.

TEODORO, S. R. **A história da ciência e as concepções alternativas de estudantes como subsídios para o planejamento de um curso sobre atração gravitacional.** Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência). Bauru: Faculdade de Ciências, UNESP, 2000.

TOULMIN, S. **Human Understanding.** Princeton: University Press, 1972.

ZYLBERSZTAJN, A. Concepções espontâneas em Física: Exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 5, n. 2, p.13-16 dez. 1983.